

Szolgáltatások a kvantum-internet részére

MTA doktori értekezés tézisei

Gyöngyösi László
PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék
2019

© Gyöngyösi László, 2019.

Kivonat

A hagyományos számítógépes architektúrák fizikai határaihoz érve, már néhány éven belül elérkezhet a kvantuminformatika világa. A kvantum-internet a kvantummechanika alapjelenségeire építve tesz lehetővé hálózati kommunikációt. A kvantum-internet speciális hálózati struktúrája egy nagy komplexitású problémateret definiál, számos előnnyel és jelenleg is nyitott kérdéssel. Fejlett és hatékony szolgáltatások definiálása kiemelt fontosságú feladat a kvantum-internet kiépítéséhez. A doktori értekezés újszerű, nagy hatékonyságú decentralizált útvonalválasztó szolgáltatást, összefonódottság-differenciáló szolgáltatást, valamint többrétegű optimalizálási szolgáltatást definiál a kvantum-internet részére. A disszertációban bevezetett szolgáltatások célja a kvantum-interneten belüli kommunikációs folyamatok hatékonyságának növelése, valamint erőforrás szükségletének csökkentése.

Téziscsoportok

1. téziscsoport: Decentralizált útvonalválasztó szolgáltatás a kvantum-internet részére

1.1. tézis (Összefonódott hálózati struktúra leképezése) *Az N kvantumhálózat összefonódott hálózati struktúrája leképezhető egy k -dimenziós, n -méretű G^k bázisgráfba.*

1.2. tézis (Összefonódott hálózati struktúra stabilizálási folyamata) *Az N összefonódott kvantumhálózat stabilizálási folyamata megvalósítható a csomópontok közti kvantumteleportációval.*

1.3. tézis (Útvonalválasztó szolgáltatás komplexitása) *A decentralizált útvonalválasztó szolgáltatás komplexitása $\mathcal{O}(\log n)^2$, tetszőleges N összefonódott kvantumhálózat esetén.*

2. téziscsoport: Összefonódottság-differenciáló szolgáltatás a kvantum-internet részére

2.1. tézis (Hamiltoni dinamikára épülő összefonódottság-generáló protokoll távoli pontok között) *A Hamiltoni dinamikára épülő összefonódottság-generáló protokoll segítségével maximálisan összefonódott kvantumrendszerek generálhatóak a kvantum-internet felhasználói között.*

2.2. tézis (Differenciálás az összefonódottság mértékében) *Az összefonódottság-differenciáló szolgáltatás az összefonódott állapotok összefonódottságának mértékét a relatív entrópia függvény szerint képes differenciálni a kvantum-internet felhasználói között.*

2.3. tézis (Differenciálás az időtartományban) *Az összefonódottság-differenciáló szolgáltatás képes differenciálni a maximálisan összefonódott állapotok generálásához szükséges időmennyiséget a kvantum-internet felhasználói között.*

3. téziscsoport: Többrétegű optimalizálási szolgáltatás a kvantum-internet részére

3.1. tézis (Struktúra az összefonódottság átviteli hatékonyság leírására) *A \mathcal{G}_{et} összefonódottság-átviteli fa egy struktúra a többrétegű optimalizálási szolgáltatás részére. A definiált struktúra a \mathcal{G}_m kvantummemória allokációs gráfból nyerhető.*

3.2. tézis (A kvantum-internet kvantum rétegének optimalizálása) *Az N összefonódott hálózati struktúra kvantum rétege a \mathcal{P}_Q procedura segítségével optimalizálható. A definiált \mathcal{P}_Q procedura a kvantumállapotok t_s tárolási idejének minimalizálásán keresztül csökkenti a kvantum-internet csomópontjainak kvantummemória szükségletét, maximalizálja az összefonódott kapcsolatok B_F átviteli sebességét, valamint minimalizálja az összefonódott hálózati struktúrát biztosító összefonódott útvonalak $|\mathcal{P}|$ számát, tetszőleges kvantumcsomópontok között.*

3.3. tézis (A kvantum-internet klasszikus rétegének optimalizálása) *A klasszikus réteg optimalizálása a klasszikus réteg költségét leíró költségfüggvényen keresztül realizálható, a klasszikus réteget optimalizáló \mathcal{P}_C procedura segítségével.*

1. Bevezetés

A Moore-törvény alapján [77], napjaink félvezető-alapú technológiái hamarosan elérik a fizikai határokat [3, 16, 17, 30, 44, 47, 76, 86, 115], így már néhány éven belül elérkezhet a kvantuminformatika világa. A kvantuminformatika megjelenésével mind a számítástechnika, mind pedig a kommunikációs rendszerek lehetőségei nagyságrendekkel bővíthetőek a hagyományos rendszerekhez képest [39, 40, 48, 55, 74, 108, 117–121]. A kvantumszámítógépek néhány éven belüli megjelenésével [1, 40, 47, 94, 117], a tradicionális internet, a biztonsági kritériumok sérülése miatt nem alkalmazható tovább a gyakorlatban. Ennek következtében, egy alapvetően új hálózati struktúra bevezetése válik szükségessé, amely a kvantummechanika jelenségeire alapozottan tesz lehetővé biztonságos hálózati kommunikációt. Az új hálózati struktúra a *kvantum-internet* [55, 74, 118, 121].

A kvantum-internetnek, a hagyományos internethez hasonlóan, képesnek kell lennie a távoli pontok közti hatékony kommunikáció megvalósítására, valamint nagyszámú felhasználó párhuzamos kiszolgálására. A kvantum-interneten belül így szintén szükséges a jelisméltó és switcher (váltó) hálózati funkciók alkalmazása. Ugyanakkor, az ún. *no-cloning* (klónozzhatatlansági) tétel [128] értelmében, a kvantumállapotok másolása, így a kvantumjelisméltés a hagyományos internetes rendszereken belüli eljárásokkal nem lehetséges. Így mind a kvantumjelisméltó elemek, mind pedig a kvantum-internetet alkotó hálózati entitások működése alapvetően különbözik a hagyományos interneten belüli megoldásoktól.

A kvantum-internet a kvantummechanika alapjelenségeire építve tesz lehetővé hálózati kommunikációt a felhasználók között [2, 7–11, 32–39, 49, 55, 59, 62, 74, 89, 91–93, 118–121]. A kvantum-internet elsődleges attribútumai az abszolút biztonság (kvantumkulcsszétosztás, kvantumkriptográfiai protokollok), kvantumjelenségek és fejlett kommunikációs protokollok (szuperponált kvantumállapotok, összefonódottság, teleportáció, kvantumkódolás, egyéb kvantumprotokollok), valamint az összefonódott hálózati struktúra [4, 12, 13, 28, 41, 42, 57, 69–73, 75, 80, 105, 110, 129–131]. A kvantum-internet megvalósítására, a kvantummechanika posztulátumai [39, 49, 118, 128] a hagyományos internetétől alapvetően eltérő hálózati struktúrát igényelnek [127]. Ennek következményeként, a kvantum-internet újszerű és nagy hatékonyságú szolgáltatások és eljárások definiálását igényli.

Egy kvantum-internetes hálózati környezetben az egyik elsődleges probléma az összefonódott hálózati struktúra kialakítása az ún. összefonódottság-terjesztéssel (entanglement distribution). Az összefonódottság kialakítás egy közbenső kvantumjelisméltó struktúrán keresztül valósul meg a távoli küldő és fogadó pontok között [6, 20–23, 29, 31, 58, 65, 103, 107, 111, 114, 116, 133]. Az összefonódottság kialakítása lépésről-lépésre kerül végrehajtásra a kvantumcsomópontok között. Az összefonódottság kialakítására első lépésben a közvetlen csomópontok között kerül sor, majd a kvantumcsomópontokban végrehajtott lokális műveletek segítségével (összefonódottság-kiterjesztés – entanglement swapping, összefonódottság-tisztítás – entanglement purification, egyéb lokális műveletek) kerül sor a nagyobb hatótávolságú összefonódottság kialakítására. Az össze-

fonódott kapcsolatok így különböző *összefonódottsági szinteket* definiálnak a kvantum-interneten belül. A kvantumjelismétlő architektúra esetén, egy közbenső kvantumcsomópontban végrehajtott összefonódottság kiterjesztés (swapping) operáció a kétszerezése növeli az összefonódott kapcsolat által átívelt közbenső kvantumcsomópontok számát [118, 120, 121] az összefonódott állapot egyik felét tároló forrás, illetve az állapot másik felét tároló, vevő kvantumcsomópont között. Így ezen összefonódottság-generálási módszert *duplázó-architektúrának* (doubling architecture) nevezzük. Az összefonódottság-terjesztő duplázó-architektúra célja az összefonódott kapcsolat kialakítása tetszőleges távolságban lévő forrás és vevő kvantumcsomópont között a kvantum-interneten belül.

A kvantum-internet gyakorlati implementálása a hagyományos optikai eszközökkel [4, 12, 28, 32, 41–43, 45, 46, 69, 85, 92, 93, 100, 105, 129], illetve foton-alapú kommunikációs elemekkel megvalósítható [104, 127]. A kvantum-internet esetében emellett továbbra is alkalmazhatóak maradnak a gyakorlati kvantumkommunikációs technológiák [6, 19–21, 23, 29, 58, 65, 103, 107, 111, 114, 116, 133], így a kvantum-internet összefonódott hálózati struktúrájának kialakítása nem igényli új technológiai megoldások bevezetését. A gyakorlati kvantum-internet esetében, a kvantumkommunikáció implementálható hagyományos optikai linkeken, vezetékek nélküli optikai csatornákon [26], valamint műholdas-optikai rendszereken keresztül [2, 5]. A kvantumkommunikációt kiegészítő klasszikus kommunikáció pedig a már kiépített telekommunikációs rendszerek segítségével implementálható. A kvantum-internet kommunikációs folyamatainak megvalósításához szükséges technikai háttér nagy része így, a már kiépített tradicionális architektúráknak köszönhetően rendelkezésre áll a gyakorlatban [118].

A kvantum-internet gyakorlati megvalósítása szempontjából alapvető fontosságú feladat a nagy hatékonyságú szolgáltatások és eljárások kidolgozása. Az elsődleges célok között szerepel az összefonódott hálózati struktúra kialakításához szükséges összefonódottság-generálás optimalizálása, valamint a megosztott összefonódottság kontrollálása, útvonalválasztási problémák kezelése, illetve a kvantum-internetet alkotó hálózati rétegek (kvantum réteg a kvantumkommunikációs folyamat részére, valamint klasszikus réteg a kiegészítő klasszikus kommunikációs folyamatok részére) működésének optimalizálása. A doktori értekezés célja ezen elsődleges problémák kezelése nagy hatékonyságú szolgáltatások definiálásán keresztül.

2. Doktori értekezés

2.1. Eredmények

A doktori értekezés újszerű szolgáltatásokat definiál a kvantum-internet részére. A kidolgozott szolgáltatások figyelembe veszik mind a kvantum-internet alapvető fizikai és architektúrális jellemzőit, mind pedig az összefonódott hálózati struktúra kialakításához szükséges folyamatok attribútumait. A doktori értekezésben megoldásokat definiálok a kvantum-interneten belüli útvonalkeresési problémákra, az összefonódottság megosztás és differenciálás végrehajtására, valamint a kvantum-internet rétegszintű optimalizálására.

A doktori értekezés eredményei:

- *Nagy hatékonyságú decentralizált útvonalválasztó szolgáltatást definiáltam a kvantum-internet részére [33].*
- *Újszerű szolgáltatást definiáltam az összefonódottság-generálás és az összefonódottság-differenciálás megvalósítására kvantum-internetes környezetben [35].*
- *Többrétegű optimalizálási szolgáltatást definiáltam a kvantum-internet, kvantum- és klasszikus rétegének optimalizálására [37].*

2.2. Tartalom és felépítés

A doktori értekezés tartalma és felépítése a következő. A bevezetést (Chapter 1) követően, az értekezés második fejezete (Chapter 2) röviden összefoglalja a szükséges alapfogalmakat. A disszertáció harmadik fejezete (Chapter 3) tárgyalja a decentralizált útvonalválasztó szolgáltatást. A negyedik fejezet (Chapter 4) témája az összefonódottság-differenciáló szolgáltatás. Az ötödik fejezet (Chapter 5) a többrétegű optimalizálási szolgáltatást tárgyalja. Végül, a hatodik fejezet (Chapter 6) összefoglalja az eredményeket. Kiegészítő eredmények a függelékekben találhatóak.

3. Tézisek

3.1. 1. téziscsoport: Decentralizált útvonalválasztó szolgáltatás a kvantum-internet részére

Az 1. téziscsoportban egy decentralizált útvonalválasztó szolgáltatást definiálok a kvantum-internet részre. A megoldás hatékony decentralizált útvonalkeresést biztosít a kvantum-internet összefonódott hálózati struktúrájában. A téziscsoportban vizsgálom az útvonalválasztó szolgáltatás komplexitását, az összefonódott kapcsolatok valószínűség-eloszlását, valamint az összefonódott útvonalakat alkotó összefonódott kapcsolatok számának alakulását a kvantum-internet összefonódott hálózati struktúráiban.

Motiváció

A kvantum-internetet alkotó kvantumcsomópontok közti összefonódott kapcsolatok alkotják a kvantum-internet összefonódott hálózati struktúráját [55, 74, 91, 118]. Az összefonódott struktúra jelenti az alappillérét mind a fejlett kvantumkommunikációs protokollok alkalmazhatóságának, nagy hatótávolságú QKD (quantum key distribution) rendszereknek, mind pedig egy globális kvantumhálózat kialakításának [39, 49, 55, 73, 74, 91, 118, 121]. Szemben a pont-pont jellegű kapcsolatokra épülő, nem-összefonódott hálózati struktúrájú kvantumhálózatokkal [62, 92, 93], az összefonódott struktúra lehetővé teszi mind a tetszőleges távolságok áthidalását, mind pedig a megbízható kvantumkommunikációt nagy

távolságokon. Amíg a pont-pont jellegű, nem-összefonódott kvantumhálózatok elsődlegesen csak a két pont közti QKD kialakítására alkalmazható hatékonyan, az összefonódott struktúra lehetővé teszi egy általános, nagy hatékonyságú és nagy hatótávolságú, globális kvantumkommunikációs hálózati struktúra kialakítását. A kvantum-internet alapstruktúrája így egy összefonódott hálózati struktúraként modellezhető [6, 20–23, 28, 29, 57, 59, 103, 111, 114, 116, 118, 121, 133].

Az összefonódott hálózati struktúra egy adott L_l -összefonódottságú kapcsolata, ahol l az összefonódottsági szint, egy olyan $E(x, y)$ összefonódott kapcsolatot azonosít egy x forrás kvantumcsomópont és y fogadó kvantumcsomópont között, amelyek hop-távolsága 2^{l-1} , valamint az x és y között lévő közbenső kvantumjelismétlők száma $2^{l-1} - 1$ (megj.: duplázó-architektúra feltételezése mellett, amely összefonódottsági szintenként duplázza a kvantumcsomópontok számát) [2, 4, 12, 35, 36, 41, 42, 58, 62, 65, 70, 71, 87, 89, 105, 110, 123–125].

Egy adott $E(x, y)$ kapcsolat kialakításának valószínűsége $0 < \Pr_{L_l}(E(x, y)) \leq 1$, amelyet a kvantumhálózati fizikai attribútumai határoznak meg [12, 39, 41, 42, 49, 55, 57, 58, 65, 73, 74, 91, 105, 118, 121]. Az összefonódott kapcsolat l összefonódottsági szintjének növelésével az összefonódott kapcsolat valószínűsége csökken, így a magasabb szinten összefonódott kapcsolatok valószínűsége alacsonyabb az összefonódott hálózati struktúrában [12, 21, 41, 42, 57–59, 65, 103, 105, 114, 118, 121]. Egy adott kvantumcsomópont általánosságban tetszőleges számú kvantumcsomóponttal lehet kapcsolatban, a kapcsolatok összefonódottság szintje pedig tetszőleges lehet. Az x és y kvantumcsomópontok között q kvantumjelismétlő, $R_i \in V$, $i = 1, \dots, q$, található. A kvantumjelismétlők feladata az összefonódottság kialakítás megvalósítása x és y között.

A kvantum-internet összefonódott hálózati struktúráján belüli útvonalkeresés feladata a legrövidebb útvonal meghatározása tetszőleges kvantumcsomópontok között, tetszőleges összefonódottsági szintekkel kapcsolódva a hálózati struktúrában. Az útvonalkeresési probléma során feltételezhetjük, hogy nem áll rendelkezésre centralizált hálózati entitás az útvonalválasztáshoz kvantumcsomópontok részére. Az útvonalválasztást így *decentralizált* módon, a hálózati csomópontokra, valamint az összefonódott kapcsolatokra vonatkozó globális információk nélkül, a kvantumcsomópontok lokális tudására alapozottan kell végrehajtani a kvantum-interneten belül.

A téziscsoportban igazolom, hogy az összefonódott kapcsolatok valószínűsége az N összefonódott hálózati struktúrában modellezhető egy k -dimenziós, n -méretű G^k bázisgráfban értelmezett L1 távolsággal [33]. A G^k bázisgráf egy matematikai struktúra, amely a kvantum-internet összefonódott hálózati struktúrájának leképezése. A leképezett struktúra tartalmazza mind a kvantumcsomópontok elhelyezkedését, mind pedig a kvantumhálózat összefonódott kapcsolatait. Igazolom továbbá, hogy a bázisgráfba leképezett összefonódott kapcsolatok valószínűség-eloszlása az ún. inverz k -hatványeloszlással írható le, adott k -dimenziószám esetén [33]. Belátom, hogy a decentralizált útvonalkeresés $\mathcal{O}(\log n)^2$ komplexitással végrehajtható az összefonódott hálózati struktúrában. Vizsgálom a leképezési folyamat jellemzőit, valamint igazolom, hogy a kvantumteleportációs algoritmussal megvalósítható az összefonódott hálózat leképezése, globális tudás-

sal rendelkező központi entitás nélkül [33]. Az összefonódott kapcsolatok valószínűségét meghatározó folyamatok (összefonódottság-tisztítás, összefonódottság-kiterjesztés, lokális kvantummemória műveletek) [39, 49, 55, 73, 74, 91, 118, 121], a leképezett matematikai struktúrában az L_1 metrikával modellezhetőek a decentralizált útvonalválasztás során.

Az útvonalválasztó szolgáltatás hatékonyan alkalmazható útvonalkeresési feladatok során [12, 41, 42, 57, 58, 65, 105, 118, 121], valamint kiterjesztett keresési problémákra a kvantum-interneten belül [32] (csomópont-diszjunkt, kapcsolat-diszjunkt útvonalak keresése) [19, 63, 64, 96, 97].

A decentralizált útvonalválasztó szolgáltatás több részrendszerből álló összefonódottság esetén is alkalmazható, tetszőleges dimenziószám mellett. A megoldás kétállapotú összefonódottságot feltételez alapértelmezetten, ugyanakkor mivel a többállapotú összefonódottság esetén az összefonódottság az egyes partíciók között értelmezhető, a leképezés ugyanezen megoldással megvalósítható a partíciók relációinak figyelembevételével.

Igazolom, hogy az útvonalválasztó szolgáltatás tetszőleges méretű összefonódott hálózati struktúra esetén alkalmazható, valamint az összefonódott kapcsolatokkal a leképezési folyamat kvantumteleportáció segítségével megvalósítható.

A téziscsoport eredményei

A doktori értekezés 1. téziscsoportjának eredményei:

1. *Definiáltam egy decentralizált útvonalválasztó szolgáltatást a kvantum-internet részére. A kidolgozott megoldás alacsony komplexitású útvonalkeresést tesz lehetővé a kvantum-internet összefonódott hálózati struktúrájában.*
2. *Vizsgáltam az összefonódott kapcsolatok valószínűség-eloszlását.*
3. *Beláttam, hogy a kidolgozott decentralizált útvonalválasztó metódus a kvantum-internet csomópontjainak lokális információra alapozottan megvalósítható.*
4. *Igazoltam a definiált szolgáltatás komplexitását.*
5. *Elemeztem az összefonódott útvonalakat alkotó összefonódott kapcsolatok számának alakulását.*

Alkalmazott vizsgálati modell

Legyen V az N összefonódott hálózati struktúra kvantumcsomópontjainak halmaza, valamint legyen $A \in V$ egy forrás felhasználó, valamint $B \in V$ egy vevő felhasználó. A végpontok közti közbenső hálózati struktúra álljon $R_i \in V$, $i = 1, \dots, q$ kvantumjelisméltő hálózati entitásból. Legyen továbbá $E = \{E_j\}$, $j = 1, \dots, m$ az összefonódott hálózati struktúra összefonódott kapcsolatainak halmaza, amely kapcsolatok a V halmazban lévő kvantumcsomópontok között találhatóak. Egy adott, L_l -összefonódottságot, ahol az összefonódottság szintje l , $l = 1, \dots, r$, pedig azonosítsa az E_j él az x_j és y_j kvantumcsomópontok között.

A $N = (V, E)$ összefonódott hálózati struktúra álljon $l = 1$ szintű összefonódott kapcsolatokból, valamint $l > 1$ szintű összefonódott kapcsolatokból. Az összefonódott hálózat így $l = 1$ szintű összefonódott kapcsolatokon keresztül kommunikáló kvantumcsomópontokra (single-hop összefonódottság), valamint több szinten összefonódott kvantumcsomópontokra (multi-hop összefonódottság) osztható. Az $l = 1$ szinten összefonódott kvantumcsomópontok közvetlenül kapcsolódnak a fizikai rétegben az (pl. optikai link, vagy vezeték nélküli optikai csatornán keresztül), míg a több szinten összefonódott kvantumcsomópontok nem állnak egymással közvetlen fizikai kapcsolatban.

A duplázó-architektúra alkalmazása esetén [39, 74, 91, 118], az összefonódott kapcsolat által átívelt kvantumcsomópontok száma szintenként duplázódik, így a $d(x, y)_{L_l}$ hop-távolság az L_l -összefonódottsággal kapcsolódott $x, y \in V$ csomópontok esetén éppen

$$d(x, y)_{L_l} = 2^{l-1}, \quad (1)$$

ahol a közbenső kvantumjelismétlők száma $d(x, y)_{L_l} - 1$ az x és y kvantumcsomópontok között. Az $l = 1$ kapcsolódás esetén, az x és y kvantumcsomópontok közvetlenül kapcsolódnak, közbenső kvantumjelismétlők nélkül. Egy L_l -összefonódott kapcsolat valószínűsége az $x, y \in V$ kvantumcsomópontok között $\Pr_{L_l}(E(x, y))$.

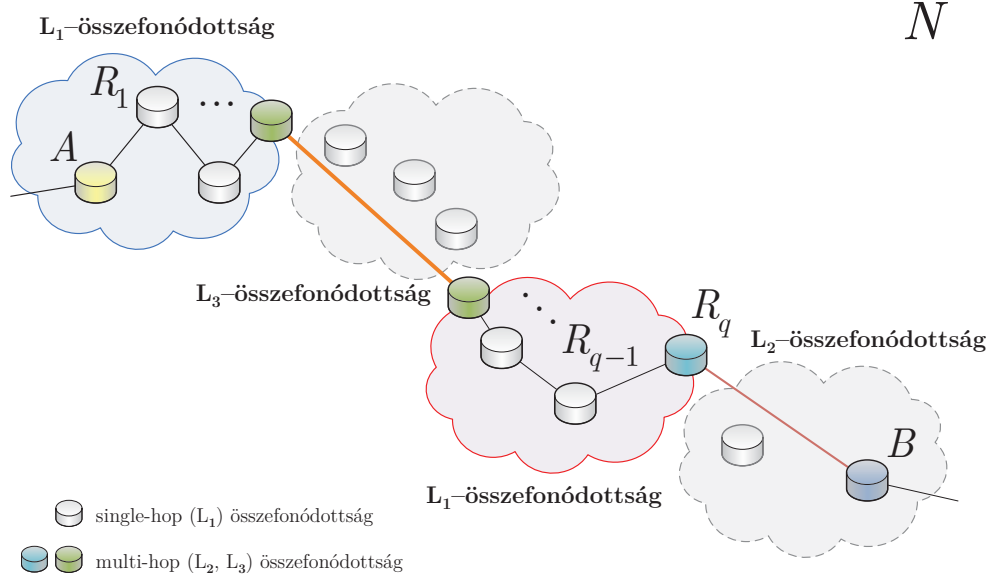
A kvantum-internet N összefonódott hálózati struktúráját szemlélteti a 3.1. ábra. A hálózat egy szinten (single-hop) összefonódott kvantumcsomópontokat (szürke) és több szinten összefonódott kvantumcsomópontokat (kék és zöld). Az egy szinten összefonódott kvantumcsomópontok között L_1 -összefonódottsággal (egyszintű összefonódottság), míg a több szinten összefonódott csomópontok L_2 - és L_3 -összefonódottsággal (többszintű összefonódottság) kapcsolódnak.

Összefonódott kapcsolatok modellezése

Az F összefonódottság-minőség koefficiens [39, 49, 118, 123–125] adott σ aktuálisan megosztott kvantumállapot esetén az x és y kvantumcsomópontok között az $F = \langle \Psi | \sigma | \Psi \rangle$ alakban adható meg, ahol $|\Psi\rangle$ a cél összefonódott kvantumállapot x és y között. Legyen σ az $E(x, y)$ kapcsolaton keresztül kialakított sűrűségmátrix, $\sigma = \sum_i p_i \rho_i = \sum_i p_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i|$. Ekkor, az $F_{E(x, y)}$ összefonódottság-minőség az x és y kvantumcsomópontok között a következő formában adható meg:

$$F_{E(x, y)} = \langle \Psi | \sigma | \Psi \rangle = \sum_i p_i |\langle \Psi | \psi_i \rangle|^2. \quad (2)$$

Az adott $E(x, y)$ összefonódott kapcsolatokhoz rendelhető $\Pr_{L_l}(E(x, y))$ valószínűségek mellett, az útvonalválasztó szolgáltatás a 2. egyenletben megadott összefonódottság-minőségre alapozottan is végrehajtható. Ennek értelmében, releváns metrikaként $F_{E(x, y)}$ is választható a legrövidebb útvonalak meghatározására. Ugyanakkor, mivel az $\Pr_{L_l}(E(x, y))$ valószínűség egy gyakorlatban releváns metrika, amely mind a fizikai zajok, mind pedig a valószínűségi alapon működő összefonódottság-tisztítási, valamint a szintén valószínűségi



3.1. ábra. Összefonódott $N = (V, E)$ hálózati struktúra kvantum-internetes környezetben. Az összefonódott hálózati struktúra különböző összefonódottsági szinteket integrál. A közvetlenül (single-hop) összefonódott csomópontok (szürke) L_1 -összefonódottsággal, a közvetve (multi-hop) összefonódott csomópontok (kék, zöld) L_2 - és L_3 -összefonódottsággal kapcsolódnak. A L_l , $l = 1, 2, 3$, összefonódott kapcsolatok valószínűsége az $x, y \in V$ csomópontok között $\Pr_{L_l}(E(x, y))$. Az összefonódott hálózati struktúra q kvantumjelismétlőt, $R_i \in V$, $i = 1, \dots, q$ tartalmaz a forrás csomópont (A) és a célcsoópont (B) között. Az L_l -összefonódottsággal kapcsolódó csomópontok között $d(x, y)_{L_l} - 1$ közbenső kvantumjelismétlő található (szaggatott vonallal jelölt halmaz).

alapon működő összefonódottság-kiterjesztési procedúra hatásait is figyelembe veszi, az útvonalválasztást a szolgáltatás az összefonódott kapcsolatokhoz rendelt $\Pr_{L_l}(E(x, y))$ metrika szerint végzi.

3.1.1 1.1. tétel: Összefonódott hálózati struktúra leképezése

Az N kvantumhálózat összefonódott hálózati struktúrája leképezhető egy k -dimenziós, n -méretű G^k bázisgráfba.

Bizonyítás. A bizonyítás a doktori értekezés 3.2.3-as szekciójában található. ■

Az összefonódott hálózati struktúra leképezése során, a kvantumcsomópontoknak egymással releváns információkat kell megosztaniuk (ún. stabilizációs procedúra). A $\phi(x_i)$ és $\phi(y_i)$ információk az $\phi(x_i), \phi(y_i) \in G^k$ kvantumcsomópontok között nem hajtható végre klasszikus csatornán keresztül a leképezési folyamat integritása és biztonsága érde-

kében [53, 102]. A leképezési folyamatot a szolgáltatás a kvantumteleportációs metódus segítségével valósítja meg.

3.1.2 1.2. tézis: Összefonódott hálózati struktúra stabilizálási folyamata

Az N összefonódott kvantumhálózat stabilizálási folyamata megvalósítható a csomópontok közti kvantumteleportációval.

Bizonyítás. A bizonyítás a doktori értekezés 3.2.4-es szekciójában található. ■

Újgenerációs kvantumjelismétlők

A fentebb bevezetett 1. egyenlet a duplázó-architektúrát feltételez, ugyanakkor az útvonalválasztó szolgáltatás kiterjeszthető az ún. újgenerációs kvantumjelismétlőkből [80] álló kvantumhálózatokra is. Ezen hálózatok alapvetően pont-pont jellegű QKD-t alkalmaznak a kvantumcsomópontok között, a hálózati struktúra pedig nem összefonódott. Mivel az útvonalválasztó szolgáltatás alapmetrikája a kapcsolatok valószínűsége, így az útvonalválasztó szolgáltatás a kvantum-internet, nem-összefonódott hálózati struktúrában is alkalmazható. Ehhez, a korábban alkalmazott l szint paraméter felüldefiníálása szükséges, a következő formában

$$l = d(x, y). \quad (3)$$

Nem-összefonódott struktúra esetén tehát az l szint éppen a $d(x, y)$ távolsággal azonos, amely másképpen a pont-pont kapcsolatban álló kvantumcsomópontok számát azonosítja a forrás x és fogadó y kvantumcsomópont között.

Decentralizált útvonalválasztás

A decentralizált útvonalválasztási metódus, a k -dimenziós G^k bázisgráfban az L1 metrika alapján határozza meg a legrövidebb útvonalat a leképezett kvantumcsomópontok között, a köztük lévő összefonódott kapcsolatok szerint. A bázisgráfban két tetszőleges kvantumcsomópont, $\phi(x), \phi(y)$ között az L_l -összefonódottság valószínűsége éppen $p(\phi(x), \phi(y))$, amely valószínűségek megegyezik a kvantum-internetes struktúrában található összefonódott kapcsolat $\Pr_{L_l}(E(x, y))$ valószínűségével az x és y kvantumcsomópontok között. A leképezett összefonódott kapcsolatok valószínűségeinek megtartását a G^k bázisgráf struktúrája biztosítja.

3.1.3 1.3. tézis: Útvonalválasztó szolgáltatás komplexitása

A decentralizált útvonalválasztó szolgáltatás komplexitása $\mathcal{O}(\log n)^2$, tetszőleges N összefonódott kvantumhálózat esetén.

Bizonyítás. A bizonyítás a doktori értekezés 3.3.1-es szekciójában található. ■

Téziscsoport összefoglalás

Az 1. téziscsoport egy nagy hatékonyságú, decentralizált útvonalválasztó szolgáltatást definiált a kvantum-internet részére. A szolgáltatás alkalmazható mind a kvantum-internet összefonódott hálózati struktúráiban, mind pedig nem-összefonódott, pont-pont jellegű kvantumhálózati struktúrákban. A szolgáltatás decentralizált jellegű, így az útvonalválasztás nem igényli központi hálózati entitás feltételezését, illetve globális tudás alkalmazását.

3.2. 2. téziscsoport: Összefonódottság-differenciáló szolgáltatás a kvantum-internet részére

A kvantum-internet egyik alappillére a kvantum összefonódottság. Egy kvantum-internetes környezetben, ahol a felhasználók eltérő prioritás szinttel rendelkeznek, kiemelt fontosságú probléma az összefonódottság differenciálás. A doktori értekezés 2. téziscsoportja egy összefonódottság-generáló és összefonódottság-differenciáló szolgáltatást (EAD - entanglement availability differentiation) definiál a kvantum-internet részére. A szolgáltatás a Hamiltoni dinamikára alapozottan hajtja végre az összefonódott állapotok kialakítását, valamint az összefonódottság differenciálását a felhasználók között. Az összefonódottság differenciálásra két metódus biztosít a szolgáltatás. Az összefonódottság differenciálás megvalósítható az összefonódottság mértékében, valamint az időtartományban. Az összefonódottság mértékben történő differenciálás az összefonódottsághoz rendelt relatív entropia függvény szerint kerül végrehajtásra. Az időtartományban történő differenciálásra a maximálisan összefonódott kvantumállapotok kialakításához szükséges időmennyiség alapján kerül sor. A 2. téziscsoport eredményei nagy hatékonyságú összefonódottság generálást és differenciálást biztosítanak a kvantum-internet részére.

Motiváció

A kvantum-internet [55, 74] egyik alapvető fontosságú problémája az összefonódottság kialakítása a felhasználók között [14, 15, 36, 39, 49, 54, 60, 62, 74, 79, 88, 91–93, 112, 118, 120, 121]. Az összefonódottság kialakítására több metódus is ismert [14, 15, 54, 60, 79, 88, 112], valamint a kvantum-internet fizikai eszközeinek implementálására is számos eredmény rendelkezésre áll [2, 4–6, 20–23, 28, 29, 50, 55, 59, 61, 70, 71, 73, 89, 103, 107, 110, 111, 114, 116, 129, 131, 133]. Ugyanakkor, ezen eredmények általánosságban a kvantum átvitel fizikai jellemzőire [36, 49, 79, 120, 121], az összefonódottság-kiterjesztés, valamint összefonódottság-purifikációs eljárások fizikai implementációra, valamint a kvantummemória egységek fizikai jellemzőire fókuszálnak [4, 6, 20–23, 28, 29, 50, 55, 59, 70, 71, 73, 89, 103, 107, 110, 111, 114, 116, 129, 131, 133]. Az összefonódottság differenciálás egy olyan kiemelt probléma egy általános kvantum-internetes környezetben, amelyre ezen, alapvetően összefonódottság-generáló metódusok nem adnak választ.

Az összefonódottság differenciálás egy kvantum-internetes környezetben általános jellegű igény, mivel egy többfelhasználós hálózati rendszer esetén a felhasználók priorizál-

hatósága a hálózati alapszolgáltatások része.

A doktori értekezés 2. téziscsoportja definiálja az EAD (entanglement availability differentiation) összefonódottság-differenciáló szolgáltatást a kvantum-internet részére. A szolgáltatás két metódust definiál az összefonódottság-differenciálás megvalósítására. A kifejlesztett szolgáltatás Hamiltoni dinamika alapján végzi az összefonódottság differenciálást.

A téziscsoport eredményei

A doktori értekezés 2. téziscsoportjának eredményei:

1. *Definiáltam az EAD (entanglement availability differentiation) összefonódottság-differenciáló szolgáltatást a kvantum-internet részére.*
2. *Igazoltam, hogy a szolgáltatás a Hamiltoni dinamika segítségével képes az összefonódottság differenciálására a kvantum-internet felhasználói között.*
3. *Az összefonódottság-differenciálás végrehajtására definiáltam két metódust a szolgáltatáson belül. Igazoltam, hogy az első módszer a felhasználók közti összefonódottság mennyiségében hajtja végre az összefonódottság-differenciálást. Beláttam, hogy a második módszer maximálisan összefonódott állapotokat generál a felhasználók között, a differenciálást pedig az időtartományban végzi.*
4. *A szolgáltatás részére kidolgozott keretrendszer nagy hatékonyságú összefonódottság-differenciálást tesz lehetővé a kvantum-internet felhasználói között. A megoldás hatékonyan implementálható a gyakorlatban a Hamiltoni dinamikára alapozottan.*

Alkalmazott vizsgálati modell

Az EAD keretrendszere egy klasszikus átviteli fázisra (1. fázis), valamint egy kvantumkommunikációs fázisra (2. fázis) osztható. Az 1. fázisban kerül sor a differenciálás megvalósításához szükséges járulékos információk megosztására a felek között. A 2. fázisban kerül sor a kvantumállapotok megosztására, valamint a kvantumoperátorok alkalmazására.

Az EAD szolgáltatás, az összefonódottság kialakítást valamint összefonódottság differenciálást Hamiltoni dinamika segítségével hajtja végre, ami hatékony gyakorlati implementációt biztosít kvantum-internetes környezetben. Az összefonódottság-differenciálásra a felek oldalán alkalmazott lokális unitér operátorokkal kerül sor. Az unitér operátorok alkalmazásához szükséges klasszikus információt a felek a kvantumkommunikációs fázis előtti klasszikus kommunikációs fázisban kapják meg. A szolgáltatás egyszerűen implementálható a gyakorlatban, speciális eszközök és hálózati komponensek igénybevétele nélkül. Az EAD szolgáltatás így hatékony összefonódottság-generálást és összefonódottság-differenciálást biztosít a kvantum-internet felhasználói részére.

Az EAD szolgáltatáson belüli összefonódottság kialakítási módszert a doktori értekezésben definiált Protocol 0 tárgyalja. Az EAD összefonódottság-differenciálási módszereit a Protocol 1 és Protocol 2 definiálja.

Összefonódottság relatív entrópiája

Az $E(\rho)$ összefonódottság relatív entrópiája [123–125] egy adott, A és B részrendszerekből álló ρ sűrűségmátrix esetén a $D(\cdot\|\cdot)$ kvantum relatív entrópia függvény segítségével fejezhető ki, a következő formában:

$$E(\rho) = \min_{\rho_{AB}} D(\rho\|\rho_{AB}) = \min_{\rho_{AB}} \text{Tr}(\rho \log \rho) - \text{Tr}(\rho \log(\rho_{AB})), \quad (4)$$

ahol ρ_{AB} szeparálható állapotok sűrűségmátrixa, $\rho_{AB} = \sum_{i=1}^n p_i \rho_{A,i} \otimes \rho_{B,i}$.

3.2.1 2.1. tézis: Hamiltoni dinamikára épülő összefonódottság-generáló protokoll távoli pontok között

A Hamiltoni dinamikára épülő összefonódottság-generáló protokoll segítségével maximálisan összefonódott kvantumrendszerek generálhatóak a kvantum-internet felhasználói között.

Bizonyítás. A bizonyítás a doktori értekezés 4.2.3-as szekciójában található. ■

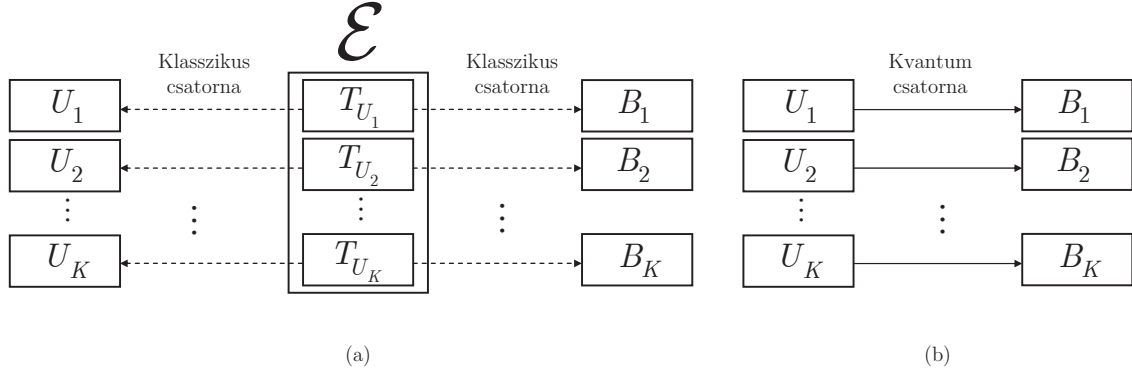
Kidolgozott keretrendszer

A szolgáltatáson belül, a lokális unitér operátorok alkalmazására adott t ideig kerül sor a felhasználóknál. A t információk terjesztésére a klasszikus kommunikációs fázisban kerül sor a felhasználók között. A t időzíti információk megválasztása függ az alkalmazni kívánt összefonódottság-differenciálási módszertől. Egy adott U_i , i -ik felhasználóhoz rendelt lokális unitér transzformáció végrehajtási ideje T_{U_i} . A modellben emellett az i -ik küldő oldali felhasználót U_i -vel, míg az i -ik fogadó oldali felhasználót B_i -vel jelöljük.

Az összefonódottság-differenciáló szolgáltatás keretrendszerét szemlélteti a 3.2. ábra. Az első fázisban (3.2.(a)) kerül sor az unitér transzformációk végrehajtásához szükséges időzíti információk terjesztésére a felhasználók között. Ezen fázis klasszikus kommunikációs csatornán keresztül végrehajtásra. A második fázisban (3.2.(b)) kerül sor az összefonódott állapotok kialakítására, valamint az összefonódottság differenciálásra a felhasználók között, lokális unitér operátorok alkalmazásán keresztül. Az unitér operátorok végrehajtására az első fázisban terjesztett időzíti információknak megfelelően kerül sor.

Összefonódottság-differenciálási módszerek

A szolgáltatáson belül két módszer szerint kerülhet sor az összefonódottság-differenciálás megvalósításra.



3.2. ábra. Összefonódottság-differenciálási szolgáltatás kvantum-internetes környezetben. (a) 1. fázis: klasszikus kommunikáció. Az \mathcal{E} hálózati entitás klasszikus csatornán keresztül szétosztja az U_1, \dots, U_K küldő és B_1, \dots, B_K vevő felhasználók között az összefonódottság-differenciáláshoz szükséges információkat. (b) 2. fázis: kvantumkommunikáció. A felhasználók kialakítják az összefonódott állapotokat a Hamiltoni dinamikára épülő protokoll segítségével, majd a T_{U_1}, \dots, T_{U_K} időzítési információk alapján az U_1, \dots, U_K felhasználók alkalmazzák az összefonódottság-differenciáláshoz szükséges lokális unitér operátorokat.

Az 1. módszer (*Protocol 1*) esetén a differenciálás a felhasználók közti összefonódott állapothoz rendelt relatív entrópia mértéke szerint történik. A felhasználók ismerik a Hamiltoni dinamikát leíró globális hálózati oszcillációs periódusidőt, az összefonódottsághoz tartozó relatív entrópia differenciálására a lokális unitér operátorok alkalmazásán keresztül kerül sor az egyes felhasználók között.

A 2. módszer (*Protocol 2*) esetén nincs globális hálózati oszcillációs periódusidő a felhasználók között, a felhasználók mindegyike maximálisan összefonódott állapotot generál. Ebben az esetben az összefonódottság relatív entrópiája minden felhasználó esetében maximális, a differenciálásra az összefonódottság kialakításához szükséges időmennyiségben kerül sor.

3.2.2 2.2. tétel: Differenciálás az összefonódottság mértékében

Az összefonódottság-differenciáló szolgáltatás az összefonódott állapotok összefonódottságának mértékét a relatív entrópia függvény szerint képes differenciálni a kvantum-internet felhasználói között.

Bizonyítás. A bizonyítás a doktori értekezés 4.3.1-es szekciójában található. ■

3.2.3 2.3. tézis: Differenciálás az időtartományban

Az összefonódottság-differenciáló szolgáltatás képes differenciálni a maximálisan összefonódott állapotok generálásához szükséges időmennyiséget a kvantum-internet felhasználói között.

Bizonyítás. A bizonyítás a doktori értekezés 4.3.2-es szekciójában található. ■

Metódusok analízisa

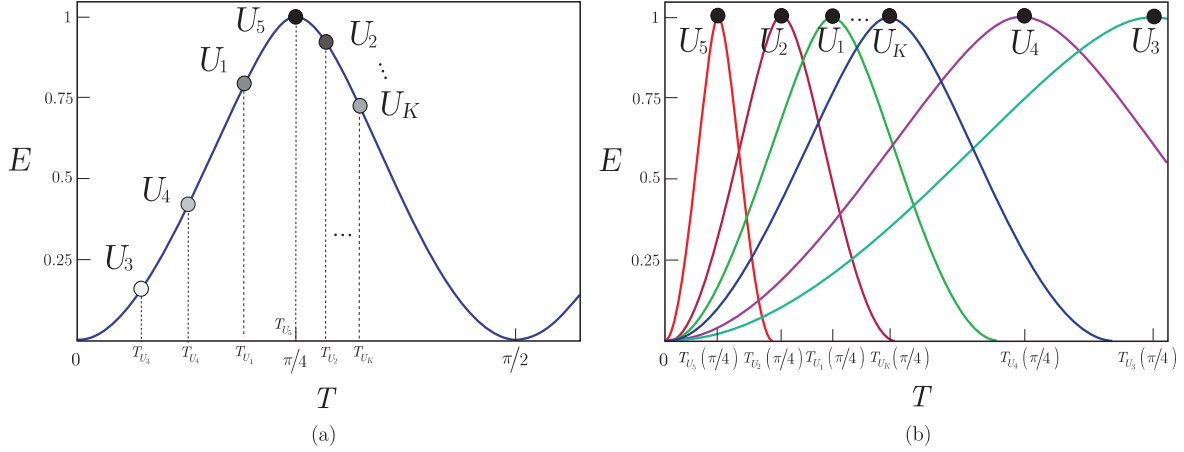
Az összefonódottság-differenciáló szolgáltatás metódusait szemlélteti a 3.3. ábra. A 3.3(a) ábra az 1. metódust szemlélteti, a differenciálásra az összefonódottság mértékében kerül sor az összefonódottsághoz rendelt relatív entrópia mértéke szerint. A felhasználók ekkor eltérő mértékű összefonódottságot kapnak, azok prioritása szerint. A 3.3(b) ábrán az időtartományban történő differenciálási metódus (2. metódus) szemléltetése látható. A felhasználók mindegyike maximálisan összefonódott állapotot kap, a kialakításhoz szükséges időmennyiség azonban eltér a felhasználók prioritása szerint.

Téziscsoport összefoglalás

Az összefonódottság differenciálás egy kiemelt fontosságú probléma a kvantum-internet többfelhasználós környezetében. A 2. téziscsoport egy összefonódottság-differenciáló szolgáltatást definiált a kvantum-internet részére. A szolgáltatás Hamiltoni dinamikára alapozottan, lokális unitér műveletek alkalmazásával végzi a differenciálást a felhasználók között, azok prioritásszintjeinek megfelelően. A szolgáltatáson belül definiált két metódus hatékony differenciálást tesz lehetővé mind az összefonódottság mértékében, mind pedig az időtartományban. A keretrendszer nem igényli összefonódott állapotok küldését a fizikai rétegben, így a szolgáltatás a kvantum-internet zajos hálózati környezetében is nagy hatékonysággal alkalmazható.

3.3. 3. téziscsoport: Többrétegű optimalizálási szolgáltatás a kvantum-internet részére

A 3. téziscsoport egy többrétegű optimalizálási szolgáltatást definiál a kvantum-internet részére. A többrétegű optimalizálási procedúra célja a kvantum-internet kvantum rétegének, valamint klasszikus rétegének optimalizálása fejlett eljárások segítségével. A kvantum-internet kvantum rétegének optimalizálása során a cél a kvantumcsomópontok kvantummemória szükségletének minimalizálása, az összefonódott kapcsolatok átviteli sebességének maximalizálása, valamint tetszőleges kvantumcsomópontok közti összefonódott útvonalak számának minimalizálása. A klasszikus réteg optimalizálása során a cél, a kvantum réteg működéséhez szükséges járulékos klasszikus kommunikációs költségek minimalizálása. A többrétegű optimalizálási szolgáltatás egy, a gyakorlatban is



3.3. ábra. Az összefonódottság-differenciálási szolgáltatás metódusainak összehasonlítása. (a) 1. metódus. A kvantum-internetes felhasználók eltérő mértékű összefonódottságot kapnak, $E(U_i : B_i) \leq 1$, adott globális T_π hálózati periódusidő mellett. A differenciálás az összefonódottság mértékében kerül végrehajtására, az összefonódottsághoz rendelt relatív entrópia mértéke szerint. A differenciálásra az $U_i, i = 1, \dots, K$ felhasználó esetében a T_{U_i} ideig alkalmazott lokális unitér operátorral kerül sor. Az adott hálózati szituációban az U_5 felhasználóhoz tartozik a legmagasabb prioritás, így U_5 egy maximálisan összefonódott állapotot kap. A legalacsonyabb prioritású felhasználó U_3 , így U_3 alacsony mértékű összefonódottságot kap. (b) 2. metódus. A kvantum-internetes felhasználók mindegyike maximálisan összefonódott állapotot kap, $E(U_i : B_i) = 1$, az állapotok kialakításához szükséges időmennyiség azonban eltér a felhasználókhoz tartozó prioritás szerint. Az $U_i, B_i, i = 1, \dots, K$ felhasználókhoz $T_\pi(U_i : B_i)$ periódusidők tartoznak, a lokális unitér operátorok végrehajtási ideje pedig $T_{U_i}(\pi/4) = T_\pi(U_i : B_i)/4$. A legmagasabb prioritású felhasználó U_5 , így ezen felhasználóhoz tartozik a legalacsonyabb periódusidő. A legalacsonyabb prioritású felhasználó U_3 , így ezen felhasználóhoz tartozik a legnagyobb periódusidő.

implementálható, nagy hatékonyságú optimalizálási keretrendszert definiál a kvantum-internet részére.

Motiváció

A doktori értekezés 3. téziscsoportjában definiált szolgáltatás, a kvantum-internet kvantum rétegének optimalizálását a kvantum-internet elsődleges fizikai attribútumaira alapozottan hajtja végre [35, 36, 39, 49, 74, 91, 118]. A kvantum-internet kvantum rétegének optimalizálása egy komplex feladat, amely magában foglalja mind a kvantumcsomópontok lokális jellemzőit, mind pedig a kvantumcsomópontok közti összefonódott kapcsolatokat átviteli karakterisztikáit valamint az összefonódott kapcsolatok eloszlását. A kvantum-internet klasszikus rétegének optimalizálása során a cél a kiegészítő klasszikus kommuni-

káció költségének minimalizálása. A kvantum-internet kvantum rétegének és klasszikus rétegének optimalizálására a megfelelő költségfüggvények minimalizálásán keresztül kerül sor. A költségfüggvények kialakítására a kvantum-internet adott rétegének releváns attribútumai, valamint az elsődleges célfüggvények alapján kerül sor a szolgáltatáson belül.

A többretegű optimalizálási szolgáltatás fejlett eljárásokon keresztül hajtja végre a rétegek optimalizálását. A kvantum-internet rétegszintű optimalizálásának megvalósításához újszerű matematikai struktúrákat definiáltam (kvantummemória allokációs gráf - quantum memory utilization graph, összefonódottság-átviteli fa - entanglement throughput tree), amellyel a célfüggvények párhuzamos optimalizálása hatékonyan elvégezhető. A kvantum réteg esetén, a kvantummemória allokációs gráf egy struktúra, amely a kvantum-internet kvantumcsomópontjainak kvantummemória használatát modellezi. Az összefonódottság-átviteli fa az összefonódott kapcsolatok átviteli karakterisztikájának modellezésére szolgáló struktúra. Ezen fejlett struktúrák segítségével a kvantum-internet kvantum rétegének optimalizálása nagy hatékonysággal végrehajtható a szolgáltatáson belül definiált metódusok segítségével. A kvantum réteghez rendelt optimalizálási metódus bemenete kvantummemória allokációs gráf struktúra, kimenete pedig az összefonódottság-átviteli fa struktúrák által alkotott halmaz. Az optimalizálási metódus kimenete így a kvantum-internet kvantum rétegének optimális állapotait azonosítja, a célfüggvények párhuzamos figyelme vételével.

A kvantum-internet klasszikus rétegének optimalizálása során az elsődleges cél a klasszikus kommunikáció költségének minimalizálása. Az optimalizálás fejlett swarm-intelligencia alapú metódusok [18, 25, 66, 68, 78, 78, 81, 81, 84, 98, 101, 132], valamint valószínűségi modellek [51, 68, 78, 90, 98, 126] segítségével kerül végrehajtásra. A klasszikus réteg optimalizálása, a kvantum-internet kvantum rétegének optimalizálásához hasonlóan egy, több-célfüggvénnyel leírható problémateret definiál. Ennek következtében, az egyes célfüggvények (kvantummemória használatához rendelt klasszikus kommunikáció, összefonódottság átvitelhez rendelt klasszikus kommunikáció, valamint a legrövidebb összefonódott útvonalak processzáshoz rendelt klasszikus kommunikáció) párhuzamos optimalizálása szükséges a klasszikus réteg esetén is, amely szintén komplex probléma.

A többretegű optimalizálási szolgáltatás a kvantum-internet fizikai rétegének módosítása nélkül integrálható, így hatékonyan alkalmazható a gyakorlatban heterogén fizikai eszközök [4, 13, 28, 55, 59, 70, 72, 73, 107, 110, 130] és hálózati architektúrák esetén is [36, 39, 49, 62, 74, 91–93, 118]. A kifejlesztett többretegű optimalizálási szolgáltatás alkalmazható a kvantum-internet tetszőleges fizikai implementációi esetén is, diverz fizikai környezetekben.

A téziscsoport eredményei

A doktori értekezés 3. téziscsoportjának eredményei:

1. *Definiáltam egy többretegű optimalizálási szolgáltatást a kvantum-internet részére. A kidolgozott megoldás a rétegszintű optimalizálást a kvantum-internet kvantum-,*

és klasszikus rétegének optimalizálásán keresztül végzi.

2. *A kvantum réteg optimalizálása a kvantum-internet fizikai rétegének attribútumaira, összefonódottság-átviteli folyamataira, valamint kvantummemória allokációs jellemzőire irányul.*
3. *A klasszikus réteg optimalizálása a kvantum-internet klasszikus rétegének attribútumaira, valamint kommunikációs költségfüggvényeire irányul.*
4. *A kidolgozott többrétegű optimalizálási szolgáltatás dinamikusan alkalmazható heterogén fizikai struktúrák mellett is a kvantum-internet rétegszintű optimalizálására.*

Alkalmazott vizsgálati modell

A többrétegű optimalizálási szolgáltatás során, a kvantum-internet kvantum rétegét egy kvantumcsomópontokból álló hálózatként modellezzük. A kvantumhálózat része több forrás és cél felhasználó, valamint számos kvantumjelisméltő hálózati entitás. A kvantum-internet kvantum rétege emellett tartalmaz egy vagy több kvantum-switcher (váltó kvantumcsomópont) (S) hálózati entitást is, amely hálózati entitások alkalmasak a lokális kvantummemóriájukban tárolt összefonódott állapotok dinamikus allokációjára. Egy S kvantum-switcher csomópont emellett alkalmazhat összefonódottság-tisztító valamint összefonódottság-kiterjesztő lokális műveleteket is az összefonódott útvonalak kialakításához. Egy adott R_i kvantumjelisméltő részére csak az összefonódott kapcsolatok kialakítása engedélyezett, azok váltására, dinamikus allokációjára ezen csomópontok esetén nincs lehetőség. A kvantum-internet klasszikus rétege kommunikációs csatornák, valamint a kiegészítő üzenetek generálásához szükséges klasszikus csomópontok halmaza.

kvantummemória allokálás modellezése

A kvantum-interneten belüli kvantumcsomópontok kvantummemória allokációs folyamatnak modellezésére a szolgáltatás definiálja \mathcal{G}_m a kvantummemória inicializáló gráf struktúrát. A \mathcal{G}_m struktúra egy irányított gráf, amely a kvantum-internet kvantum rétegének releváns fizikai jellemzői alapján kerül kialakításra.

Összefonódottság átvitel modellezése

A kvantum-internet kvantum rétegét alkotó kvantumcsomópontok közti összefonódott kapcsolatok átviteli jellemzőinek modellezésére, a szolgáltatás definiálja a \mathcal{G}_{et} , összefonódottság-átviteli fa struktúrát. A \mathcal{G}_{et} struktúra célja releváns információk kinyerése az összefonódott kapcsolatok átviteli képességéről a kvantummemória allokációs gráf struktúra által tárolt információk felhasználásával. A definiált struktúra a kvantum réteg optimalizálásának kimeneti formátuma.

3.3.1 3.1. tézis: Struktúra az összefonódottság átviteli hatékonyság leírására

A \mathcal{G}_{et} összefonódottság-átviteli fa, egy struktúra a többretegű optimalizálási szolgáltatás részére. A definiált struktúra a \mathcal{G}_m kvantummemória allokációs gráfból nyerhető.

Bizonyítás. A bizonyítás a doktori értekezés 5.2.2-es szekciójában található. ■

3.3.2 3.2. tézis: A kvantum-internet kvantum rétegének optimalizálása

Az N összefonódott hálózati struktúra kvantum rétege a \mathcal{P}_Q procedura segítségével optimalizálható. A definiált \mathcal{P}_Q procedura a kvantumállapotok t_s tárolási idejének minimalizálásán keresztül csökkenti a kvantum-internet csomópontjainak kvantummemória szükségletét, maximalizálja az összefonódott kapcsolatok B_F átviteli sebességét, valamint minimalizálja az összefonódott hálózati struktúrát biztosító összefonódott útvonalak $|\mathcal{P}|$ számát, tetszőleges kvantumcsomópontok között.

Bizonyítás. A bizonyítás a doktori értekezés 5.3-as szekciójában található. ■

3.3.3 3.3. tézis: A kvantum-internet klasszikus rétegének optimalizálása

A klasszikus réteg optimalizálása a klasszikus réteg költségét leíró költségfüggvényen keresztül realizálható, a klasszikus réteget optimalizáló \mathcal{P}_C procedura segítségével.

Bizonyítás. A bizonyítás a doktori értekezés 5.4-es szekciójában található. ■

Téziscsoport összefoglalás

A doktori értekezés 3. téziscsoportja egy többretegű optimalizálási szolgáltatást definiált a kvantum-internet részére. A szolgáltatás speciális célfüggvényeket és költségfüggvényeket alkalmaz a kvantum-internet kvantum-, és klasszikus rétegének optimalizálására. A kvantum réteg optimalizálása a kvantum-internet fizikai rétegének releváns attribútumaira irányul. A klasszikus réteg optimalizálásának célja a kvantum réteg működéséhez szükséges, klasszikus kommunikációs folyamatok minimalizálása. Mind a kvantum réteg, mind pedig a klasszikus réteg optimalizálása komplex feladat, így hatékony megoldások definiálása szükséges. A kidolgozott szolgáltatás újszerű matematikai struktúrák, formulák valamint eljárások integrálásán keresztül hajtja végre a kvantum-internet rétegszintű optimalizálását. A keretrendszer független az aktuális implementációk tulajdonságaitól, így hatékonyan alkalmazható a kvantum-internet erőforrás szükségletének csökkentésére.

4. Összefoglalás

A doktori értekezés újszerű, nagy hatékonyságú szolgáltatásokat definiált a kvantum-internet részére. A kvantum-internet struktúrája egy adekvát választ jelent a kvan-

tumszámítógépek megjelenésével elérhetővé váló számítási teljesítményre. A kvantum-internet struktúrája képes garantálni adataink biztonságát a jövő kommunikációs hálózataiban, mivel a hálózati kommunikációs folyamatok a kvantummechanika alapjelenségeire épülnek. Amíg a kvantumszámítógépek napjainkban még nem hozzáférhetőek és fejlesztési fázisban vannak, addig a fejlett, nagy hatékonyságú szolgáltatások kidolgozása a kvantum-internet részére már egy aktuális, sürgető probléma. Amint a kvantumszámítógépek a gyakorlatban is elérhetővé válnak, a kvantum-internet struktúrájának készen kell állnia a problémamentes átmenet biztosítására a hagyományos internet struktúrájából a kvantum-internet struktúrájába. Így, a hatékony szolgáltatások kidolgozása, valamint a kvantum-internet kiépítéséhez kapcsolódó mérnöki problémák megoldása már napjainkban kiemelt fontosságú feladatot jelentenek.

További fontos kutatási probléma a kvantum-internethez kapcsolódó protokollok fejlesztése. Ezen terület egyik fő kihívása a szabványosítási folyamat, valamint a globális kvantum-internethez szükséges alapszabványok és alap-protokollok kialakítása. Ezen célkitűzések mentén alakult a Quantum Internet Research Group (QIRG) [95] kutatócsoport is, nemzetközi kutatói háttérrel és támogatással. A QIRG csoport célkitűzései [127] között szerepel a gyakorlati kvantum-internet megvalósíthatóságához szükséges fizikai apparátus kialakítása, a protokollok és szabványok kidolgozása, az együttműködési, kapcsolat kialakítási, hálózati és kódolási problémák kutatása, a hálózati rétegstruktúra kidolgozása, valamint a kvantum-internet alkalmazási rétegének kialakítása.

5. Publikációk

5.1. Folyóiratcikk

- [1] Gyongyosi, L. and Imre, S. A Poisson Model for Entanglement Optimization in the Quantum Internet, *Quantum Information Processing*, Springer Nature, DOI: 10.1007/s11128-019-2335-1 (2019).
- [2] Gyongyosi, L. and Imre, S. Quantum Circuit Design for Objective Function Maximization in Gate-Model Quantum Computers, *Quantum Information Processing*, Springer Nature, DOI: 10.1007/s11128-019-2326-2 (2019).
- [3] Gyongyosi, L. and Imre, S. Entanglement Access Control for the Quantum Internet, *Quantum Information Processing*, Springer Nature, DOI: 10.1007/s11128-019-2226-5 (2019).
- [4] Gyongyosi, L. and Imre, S. Opportunistic Entanglement Distribution for the Quantum Internet, *Scientific Reports*, Nature, DOI:10.1038/s41598-019-38495-w (2019).
- [5] Gyongyosi, L. and Imre, S. Adaptive Routing for Quantum Memory Failures in the Quantum Internet, *Quantum Information Processing*, Springer Nature, DOI: 10.1007/s11128-018-2153-x (2018).
- [6] Gyongyosi, L. and Imre, S. Dense Quantum Measurement Theory, *Scientific Reports*, Nature, DOI: 10.1038/s41598-019-43250-2 (2019).

- [7] Gyongyosi, L. and Imre, S. Diversity Space of Multicarrier Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *Int. J. Commun. Syst.* (Wiley) (2019).
- [8] Gyongyosi, L. and Imre, S. A Survey on Quantum Computing Technology, *Computer Science Review*, Elsevier, DOI: 10.1016/j.cosrev.2018.11.002, ISSN: 1574-0137 (2018).
- [9] Gyongyosi, L. and Imre, S. Gaussian Quadrature Inference for Multicarrier Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *Quantum Studies: Mathematics and Foundations*, Springer Nature, DOI: 10.1007/s40509-019-00183-9 (2019).
- [10] Gyongyosi, L. and Imre, S. Secret Key Rate Proof of Multicarrier Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *Int. J. Commun. Syst.* (Wiley), DOI: 10.1002/dac.3865, ISSN: 1099-1131 (2018).
- [11] Gyongyosi, L. and Imre, S. Reconciliation Optimization for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *SPIE Photonics West OPTO 2019 Proceedings* (2019).
- [12] Gyongyosi, L. and Imre, S. Topology Adaption for the Quantum Internet, *Quantum Information Processing*, Springer Nature, DOI:10.1038/s41598-018-30957-x, ISSN: 1570-0755, 1573-1332 (2018).
- [13] Gyongyosi, L. and Imre, S. Multilayer Optimization for the Quantum Internet, *Scientific Reports*, Nature, DOI:10.1038/s41598-018-30957-x (2018).
- [14] Gyongyosi, L. and Imre, S. Decentralized Base-Graph Routing for the Quantum Internet, *Physical Review A*, American Physical Society, DOI: 10.1103/PhysRevA.98.022310 (2018).
- [15] Gyongyosi, L. and Imre, S. Entanglement Availability Differentiation Service for the Quantum Internet, *Scientific Reports*, Nature, DOI:10.1038/s41598-018-28801-3 (2018).
- [16] Gyongyosi, L. and Imre, S. Multiple Access Multicarrier Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *Chaos, Solitons and Fractals*, Elsevier, DOI: 10.1016/j.chaos.2018.07.006, ISSN: 0960-0779 (2018).
- [17] Gyongyosi, L., Imre, S. and Nguyen, H. V. A Survey on Quantum Channel Capacities, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, IEEE, DOI: 10.1109/COMST.2017.2786748 (2018).
- [18] Gyongyosi, L. and Imre, S. Low-Dimensional Reconciliation for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *Appl. Sci.*, DOI: 10.3390/app8010087, ISSN 2076-3417 (2018).
- [19] Gyongyosi, L. and Imre, S. A Poisson Model for Entanglement Optimization in the Quantum Internet, *2018 SPIE Quantum Information Science, Sensing, and Computation Proceedings* (2018).
- [20] Gyongyosi, L. and Imre, S. Dynamic Topology Resilience for Quantum Networks, *2018 SPIE Photonics West OPTO Proceedings* (2018).
- [21] Gyongyosi, L. and Imre, S. Entanglement-Gradient Routing for Quantum Networks, *Scientific Reports*, Nature, DOI:10.1038/s41598-017-14394-w (2017).

- [22] Gyongyosi, L. Quantum Imaging of High-Dimensional Hilbert Spaces with Radon Transform, *International Journal of Circuit Theory and Applications (IJCTA)*, *Special Issue on Quantum Circuits* (Wiley) (2017).
- [23] Mraz, A., Kis, Zs., Bacsardi, L. and Gyongyosi, L. Quantum Circuit-based Modeling of Continuous-Variable Quantum Key Distribution System, *International Journal of Circuit Theory and Applications (IJCTA)*, *Special Issue on Quantum Circuits* (Wiley) (2017).
- [24] Gyongyosi, L. and Imre, S. Statistical Quadrature Evolution by Inference for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *SPIE Photonics West OPTO 2017 Proceedings*, „Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication X” (2016).
- [25] Gyongyosi, L. and Imre, S. Gaussian Quadrature Inference for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *Proceedings of SPIE Quantum Information and Computation IX* (2016).
- [26] Gyongyosi, L. and Imre, S. Adaptive Gaussian Quadrature Detection for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *SPIE Photonics West OPTO 2016 Proceedings*, „Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication IX” (2015).
- [27] Gyongyosi, L. and Imre, S. Multidimensional Manifold Extraction for Multicarrier Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *Proceedings of SPIE Quantum Information and Computation XIII* (2015).
- [28] Gyongyosi, L. A Statistical Model of Information Evaporation of Perfectly Reflecting Black Holes, *International Journal of Quantum Information (IJQI)*, ISSN 0219-7499 (print), 1793-6918 (online) (2014).
- [29] Gyongyosi, L. The Private Classical Capacity of a Partially Degradable Quantum Channel, *Physica Scripta - Special Issue on Quantum Information*, Institute of Physics (IOP), Online ISSN: 1402-4896 Print ISSN: 0031-8949 (2014).
- [30] Gyongyosi, L. and Imre, S. Eigenchannel Decomposition for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *SPIE Photonics West OPTO 2015 Proceedings*, „Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication VIII”, (2015).
- [31] Gyongyosi, L. The Structure and Quantum Capacity of a Partially Degradable Quantum Channel, *IEEE Access*, ISSN: 2169-3536 (2014).
- [32] Gyongyosi, L. and Imre, S. Geometrical Analysis of Physically Allowed Quantum Cloning Transformations for Quantum Cryptography, *Information Sciences*, ELSEVIER, ISSN: 0020-0255; (2014).
- [33] Gyongyosi, L. Quantum Information Transmission over a Partially Degradable Channel, *IEEE Access*, ISSN: 2169-3536 (2014).
- [34] Gyongyosi, L. The Correlation Conversion Property of Quantum Channels, *Quantum Information Processing*, Springer, ISSN: 1570-0755 (print version), ISSN: 1573-1332 (electronic version). (2013).

- [35] Gyongyosi, L. and Imre, S. Adaptive Multicarrier Quadrature Division Modulation for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *Proceedings of SPIE Quantum Information and Computation XII* (2014).
- [36] Gyongyosi, L. and Imre, S. Long-distance Continuous-Variable Quantum Key Distribution with Advanced Reconciliation of a Gaussian Modulation, *Proceedings of SPIE Photonics West OPTO 2013, „Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication VII”* (2014).

5.2. Konferenciák

- [1] Gyongyosi, L. and Imre, S. Dense Measurements for Gate-Model Quantum Computers, *Bulletin of the American Physical Society*, APS March Meeting 2018, Session on General Quantum Information and Quantum Computation, March 4–8, 2019; Boston, Massachusetts, USA.
- [2] Gyongyosi, L. and Imre, S. Time Complexity Reduction for Gate-Model Quantum Computers, *Proceedings of SPIE Quantum Information Science, Sensing, and Computation XI*, 14 - 18 April 2019, Baltimore, Maryland, USA.
- [3] Gyongyosi, L. and Imre, S. Dense Measurements for Quantum Computations, *Proceedings of Quantum Information and Measurement (QIM) V: Quantum Technologies*, OSA (The Optical Society of America), 04 April 2019 – 06 April 2019, University of Rome La Sapienza, Rome, Italy.
- [4] Gyongyosi, L. and Imre, S. A Universal Quantum Algorithm for Time Complexity Reduction of Quantum Computers, *Proceedings of Quantum Information Processing 2019 (QIP 2019)*, January 14-18, 2019, University of Colorado Boulder, USA.
- [5] Gyongyosi, L. and Imre, S. Improved Reconciliation for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *Proceedings of Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication XII*, SPIE OPTO 2019, 7 - 2 February 2019, San Francisco, California, USA.
- [6] Gyongyosi, L. and Imre, S. Problem Solving Optimization by Machine Learning for Gate-Model Quantum Computers, *Proceedings of Quantum Techniques in Machine Learning (QTML2018)*, 12-16 Nov. 2018, Durban, South Africa.
- [7] Gyongyosi, L. and Imre, S. Unsupervised Machine Learning Control of Quantum Gates in Gate-Model Quantum Computers, *Proceedings of the Frontiers in Optics 2018 (FiO 2018)*, Optical Society of America (OSA), 16-20 Sept. 2018, Washington, D.C., USA.
- [8] Gyongyosi, L. and Imre, S. Entanglement Concentration Service for the Quantum Internet, *Proceedings of the Frontiers in Optics 2018 (FiO 2018)*, Optical Society of America (OSA), 16-20 Sept. 2018, Washington, D.C., USA.
- [9] Gyongyosi, L. and Imre, S. Post-Processing Optimization for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *Proceedings of QCrypt 2018, 8th International Conference on Quantum Cryptography*, 27–31 August 2018, Shanghai, China.

- [10] Gyongyosi, L. and Imre, S. Layout Generation with Decoherence Estimation for Gate-Model Quantum Computer Architectures, *Bulletin of the American Physical Society*, APS DAMOP, 49th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics APS Meeting, Session on Quantum Information Science, May 28–June 1 2018; Ft. Lauderdale, Florida, USA.
- [11] Gyongyosi, L. Quantum Circuit Design Automation for Quantum Computers, *Proceedings of the 2018 International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC 2018)*, March 12-16, 2018, Louisiana State University, Baton Rouge, USA.
- [12] Gyongyosi, L. and Imre, S. A Poisson Model for Entanglement Optimization in the Quantum Internet, *Proceedings of SPIE Quantum Information Science, Sensing, and Computation X*, 15 - 19 April 2018, Orlando, Florida, USA.
- [13] Gyongyosi, L. and Imre, S. Quantum Circuit Designs for Gate Model Quantum Computers, *Bulletin of the American Physical Society*, APS March Meeting 2018, APS Division of Quantum Information (DQI) Session, March 5–9, 2018; Los Angeles, California, USA.
- [14] Gyongyosi, L. and Imre, S. Dynamic Topology Resilience for Quantum Networks, *Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication XI*, SPIE OPTO 2018, 27 January - 1 February 2018, San Francisco, California, USA.
- [15] Gyongyosi, L. Entanglement Distribution and Routing in Quantum Communication Networks, *Quantum Summit 2017*, 11-17 Oct 2017, Chengdu, China.
- [16] Gyongyosi, L. Efficient Decentralized Routing in Quantum Networks, *QCrypt 2017, 7th International Conference on Quantum Cryptography*, 18-22 Sept 2017, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.
- [17] Gyongyosi, L. Multicarrier Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *QCrypt 2017, 7th International Conference on Quantum Cryptography*, 18-22 Sept 2017, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.
- [18] Gyongyosi, L. and Imre, S. Hamiltonian Dynamics for Entanglement Distribution in Quantum Networks, *SPIE Quantum Communications and Quantum Imaging XV*, 6 - 10 August 2017, San Diego, California, USA.
- [19] Gyongyosi, L. and Imre, S. Decentralized Routing and Diameter Bounds in Entangled Quantum Networks, *APS DAMOP 2017*, 48th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics, Session on Quantum Networks and Photon Sources, Bulletin of the American Physical Society, The American Physical Society, June 5–9, 2017; Sacramento, California, USA.
- [20] Gyongyosi, L. and Imre, S. Fast Entanglement Establishment via Local Dynamics for Quantum Repeater Networks, *APS March Meeting 2017*, Session on Entanglement in Open Quantum Systems, Bulletin of the American Physical Society, The American Physical Society, March 13–17, 2017; New Orleans, Louisiana, USA.

- [21] Gyongyosi, L. and Imre, S. Statistical Quadrature Evolution by Inference for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *SPIE Photonics West OPTO 2017*, „*Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication X*”, 28 Jan - 2 Feb 2017, San Francisco, California, USA.
- [22] Gyongyosi, L. and Imre, S. Statistical Quadrature Evolution for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *APS DAMOP 2016*, *47th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular, and Optical Physics*, Section on Quantum Information Theory, Bulletin of the American Physical Society, The American Physical Society, Volume 61, Number 7, May 23–27, 2016; Providence, Rhode Island, USA.
- [23] Gyongyosi, L. and Imre, S. Diversity Extraction for Multicarrier Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *IEEE Signal Processing Conference Proceedings*, 2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2016), Section on Quantum Communications, Budapest, 29 Aug - 2 Sept (2016).
- [24] Mraz, A., Gyongyosi, L. and Imre, S. Performance Evaluation of Scalar Reconciliation for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *IEEE Signal Processing Conference Proceedings*, 2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2016), Section on Quantum Communications, Budapest, 29 Aug - 2 Sept (2016).
- [25] Gyongyosi, L. and Imre, S. Gaussian Quadrature Inference for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *SPIE Quantum Information and Computation IX*, 17 - 21 Apr 2016, Baltimore, Maryland, USA (2016).
- [26] Gyongyosi, L. and Imre, S. Adaptive Gaussian Quadrature Detection for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *SPIE Photonics West OPTO 2016*, „*Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication IX*”, 13-18 Feb 2016, San Francisco, California, USA.
- [27] Gyongyosi, L. Entropy Transfer of Quantum Gravity Information Processing, *APS DAMOP 2015*, *46th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular, and Optical Physics*, Bulletin of the American Physical Society, The American Physical Society, Volume 60, Number 7, June 8–12, 2015; Columbus, Ohio, USA.
- [28] Gyongyosi, L. and Imre, S. Multidimensional Manifold Extraction for Multicarrier Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *SPIE Quantum Information and Computation XIII*, 20 - 24 Apr 2015, Baltimore, Maryland, USA (2015).
- [29] Gyongyosi, L. and Imre, S. Adaptive Quadrature Detection for Multicarrier Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *APS March Meeting 2015*, Session on Quantum Foundations and Technologies, Bulletin of the American Physical Society, March 2–6, 2015; San Antonio, Texas, USA.
- [30] Gyongyosi, L. and Imre, S. Eigenchannel Decomposition for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *SPIE Photonics West OPTO 2015*, „*Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication VIII*”, 7-12 Feb 2015, San Francisco, California, USA.

- [31] Gyongyosi, L. Singular Layer Transmission for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *2014 IEEE Photonics Conference*, 12 - 16 October 2014, San Diego, California USA.
- [32] Gyongyosi, L. and Imre, S. Quantum Imaging of High-Dimensional Hilbert Spaces with Radon Transform, *2014 Frontiers in Optics/Laser Science XXX (FiO/LS)*, 19-23 October 2014, Tucson, Arizona, USA.
- [33] Gyongyosi, L. and Imre, S. Information Processing with Quantum Gravity, *Photon14 Conference*, Quantum Electronics and Photonics 2014, Section on Quantum Information, Institute of Physics (IOP), Imperial College London, London, UK.
- [34] Gyongyosi, L. Information Processing Structure of Quantum Gravity, *Gordon Research Conference on Quantum Science: Simulation, Verification, and Control of Complex Quantum Many-Body Systems*, July 27 - August 1, Stonehill College, Easton, MA, USA (2014).
- [35] Gyongyosi, L. Multiuser Quadrature Allocation for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *Quantum Theory from Problems to Advances (QTPA)*, International Centre for Mathematical Modeling in physics, engineering and cognitive sciences (ICMM), June 9-12, 2014, Linnaeus University, Växjö, Sweden.
- [36] Gyongyosi, L. Quantum Imaging of High-Dimensional Hilbert Spaces with Radon Transform, *Quantum Theory from Problems to Advances (QTPA)*, International Centre for Mathematical Modeling in physics, engineering and cognitive sciences (ICMM), June 9-12, 2014, Linnaeus University, Växjö, Sweden.
- [37] Gyongyosi, L. and Imre, S. Information Processing with Quantum Gravity Environment, *Quantum Theory from Problems to Advances (QTPA)*, International Centre for Mathematical Modeling in physics, engineering and cognitive sciences (ICMM), June 9-12, 2014, Linnaeus University, Växjö, Sweden.
- [38] Gyongyosi, L. and Imre, S. Information Processing Structure of Quantum Gravity, *APS DAMOP 2014*, 45th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics, *Session on Quantum Information Theory*, The American Physical Society, Volume 59, Number 8, June 2-6, 2014; Madison, Wisconsin, USA.
- [39] Gyongyosi, L. and Imre, S. Adaptive Multicarrier Quadrature Division Modulation for Continuous-Variable Quantum Key Distribution, *SPIE Quantum Information and Computation XII*, 8 - 9 May 2014, Baltimore, Maryland, USA (2014).
- [40] Gyongyosi, L. and Imre, S. Long-Distance Continuous-Variable Quantum Key Distribution with Scalar Reconciliation and Gaussian Adaptive Multicarrier Quadrature Division, *APS March Meeting 2014*, Session on Quantum Communication, Decoherence, and Cryptography, Bulletin of the American Physical Society, Volume 59, Number 1, March 3-7, 2014; Denver, Colorado, USA.
- [41] Gyongyosi, L. and Imre, S. Long-distance two-way continuous variable quantum key distribution over optical fiber with Gaussian modulation, *SPIE Photonics West OPTO 2014*,

„*Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication VII*”, Session: Quantum Communication and Quantum Computing with Photons II, 1-6 Feb 2014, San Francisco, California, USA.

- [42] Gyongyosi, L. Long-Distance Two-way Continuous-Variable Quantum Key Distribution with a Gaussian Modulation, *Single Photon Workshop 2013 (SPW 2013)*, Oak Ridge National Laboratory, Quantum Information Science Group, Oct. 15-18, 2013, Oak Ridge, USA.
- [43] Gyongyosi, L. Improved Long-Distance Two-way Continuous Variable Quantum Key Distribution over Optical Fiber, Session on Quantum Communications, *2013 Frontiers in Optics/Laser Science XXIX (FiO/LS)*, 6-10 October 2013, Orlando, Florida, USA.
- [44] Gyongyosi, L. and Imre, S. Entanglement Sharing without Entanglement Transmission, Session on Quantum Communications, *2013 Frontiers in Optics/Laser Science XXIX (FiO/LS)*, 6-10 October 2013, Orlando, Florida, USA.
- [45] Gyongyosi, L. and Imre, S. Quantum Communication over Partially Degradable Quantum Channels, Session on Optics and Photonics of Disordered Systems, *2013 Frontiers in Optics/Laser Science XXIX (FiO/LS)*, 6-10 October 2013, Orlando, Florida, USA.
- [46] Gyongyosi, L. and Imre, S. Long-Distance Two-way Continuous Variable Quantum Key Distribution over Optical Fiber with Gaussian Modulation, *IONS-NA 7, 7th North American IONS conference*, 2-4 Oct 2013, Center for Optoelectronics and Optical Communications, The University of North Carolina at Charlotte (UNCC), USA.
- [47] Gyongyosi, L. The Correlation Conversion Property of Quantum Channels, *Quantum Foundations and Quantum Information (QFQI)*, International Centre for Mathematical Modeling in physics, engineering and cognitive sciences (ICMM), June 10-13, 2013, Linnaeus University, Växjö, Sweden.
- [48] Gyongyosi, L. and Imre, S. The Quantum Capacity of a Partially Degradable Quantum Channel, *Quantum Foundations and Quantum Information (QFQI)*, International Centre for Mathematical Modeling in physics, engineering and cognitive sciences (ICMM), June 10-13, 2013, Linnaeus University, Växjö, Sweden.
- [49] Gyongyosi, L. and Imre, S. Polar Codes for Partially Degradable Quantum Channels, *Quantum Foundations and Quantum Information (QFQI)*, International Centre for Mathematical Modeling in physics, engineering and cognitive sciences (ICMM), June 10-13, 2013, Linnaeus University, Växjö, Sweden.
- [50] Gyongyosi, L. and Imre, S. Quantum Channels that cannot Transmit Quantum Correlations can Generate Quantum Entanglement from Classical Correlation, *APS DAMOP 2013*, The 44th Annual DAMOP Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular, and Optical Physics (American Physical Society), Section on Quantum Information and Communication, Jun. 2013, Quebec City, Quebec, Canada.
- [51] Gyongyosi, L. Polaractivation of Hidden Private Classical Capacity Region of Quantum Channels, *IEEE Symposium on Quantum Computing and Computational Intelligence 2013*

(IEEE QCCI 2013), IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE SSCI 2013), 16-19 Apr 2013, Singapore.

- [52] Gyongyosi, L. and Imre, S. Pilot Quantum Error Correction for Global-Scale Quantum Communications, *IEEE Symposium on Quantum Computing and Computational Intelligence 2013* (IEEE QCCI 2013), IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE SSCI 2013), 16-19 Apr 2013, Singapore.
- [53] Gyongyosi, L. and Imre, S. The Correlation Conversion Property of Quantum Channels, *SPIE Quantum Information and Computation XI*, Session on Quantum Entanglement, 29 April - 3 May 2013, Baltimore, Maryland, USA.

Irodalomjegyzék

- [1] Aaronson, S. and Chen, L. Complexity-theoretic foundations of quantum supremacy experiments. *Proceedings of the 32nd Computational Complexity Conference*, CCC '17, pages 22:1-22:67 (2017).
- [2] Bacsardi, L. On the Way to Quantum-Based Satellite Communication, *IEEE Comm. Mag.* 51:(08) pp. 50-55. (2013).
- [3] Barends, R. et al. Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance. *Nature* 508, 500-503 (2014).
- [4] Biamonte, J. et al. Quantum Machine Learning. *Nature*, 549, 195-202 (2017).
- [5] Bisztray, T. and Bacsardi, L. The Evolution of Free-Space Quantum Key Distribution, *InfoComm. Journal* X:(1) pp. 22-30. (2018).
- [6] Briegel, H. J., Dur, W., Cirac, J. I. and Zoller, P. Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication. *Phys. Rev. Lett.* 81, 5932-5935 (1998).
- [7] Cacciapuoti, A. S., Caleffi, M., Tafuri, F., Cataliotti, F. S., Gherardini, S. and Bianchi, G. Quantum Internet: Networking Challenges in Distributed Quantum Computing, *arXiv:1810.08421* (2018).
- [8] Caleffi, M. End-to-End Entanglement Rate: Toward a Quantum Route Metric, *2017 IEEE Globecom*, DOI: 10.1109/GLOCOMW.2017.8269080 (2018).
- [9] Caleffi, M. Optimal Routing for Quantum Networks, *IEEE Access*, Vol 5, DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2763325 (2017).
- [10] Caleffi, M., Cacciapuoti, A. S. and Bianchi, G. Quantum Internet: from Communication to Distributed Computing, *arXiv:1805.04360* (2018).
- [11] Castelvechi, D. The quantum internet has arrived, *Nature*, News and Comment, <https://www.nature.com/articles/d41586-018-01835-3> (2018).
- [12] Chen, L. and Hayashi, M. Multicopy and stochastic transformation of multipartite pure states, *Physical Review A*, Vol.83, No.2, 022331 (2011).
- [13] Chou, C., Laurat, J., Deng, H., Choi, K. S., de Riedmatten, H., Felinto, D. and Kimble, H. J. Functional quantum nodes for entanglement distribution over scalable quantum networks. *Science*, 316(5829):1316-1320 (2007).

- [14] Chuan, T. K., Maillard, J., Modi, K., Paterek, T., Paternostro, M. and Piani, M. Quantum discord bounds the amount of distributed entanglement, arXiv:1203.1268v3, *Phys. Rev. Lett.* 109, 070501 (2012).
- [15] Cubitt, T. S., Verstraete, F., Dur, W. and Cirac, J. I. Separable States Can Be Used To Distribute Entanglement, *Phys. Rev. Lett.* 91, 037902 (2003).
- [16] Debnath, S. et al. Demonstration of a small programmable quantum computer with atomic qubits. *Nature* 536, 63-66 (2016).
- [17] DiCarlo, L. et al. Demonstration of two-qubit algorithms with a superconducting quantum processor. *Nature* 460, 240-244 (2009).
- [18] Di Caro, F. D. G., Gambardella, L. M. Swarm intelligence for routing in mobile ad hoc networks. *IEEE Swarm Intelligence Symposium*, pages 76-83 (2005).
- [19] Dijkstra, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1): 269-271 (1959).
- [20] Duan, L. M., Lukin, M. D., Cirac, J. I. and Zoller, P. Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics. *Nature*, 414, 413-418 (2001).
- [21] Dur, W. and Briegel, H. J. Entanglement purification and quantum error correction. *Rep. Prog. Phys.* 70, 1381-1424 (2007).
- [22] Dur, W., Briegel, H. J., Cirac, J. I. and Zoller, P. Quantum repeaters based on entanglement purification. *Phys. Rev. A*, 59, 169-181 (1999).
- [23] Enk, S. J., Cirac, J. I. and Zoller, P. Photonic channels for quantum communication. *Science*, 279, 205-208 (1998).
- [24] Evans, N., Dickey, C. G. and Grothoff, C. Routing in the Dark: Pitch Black, *Twenty-Third Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC 2007)*, ISSN: 1063-9527, Miami Beach, FL, USA (2007).
- [25] Farooq, M. and Di Caro, G. A. Routing protocols for next generation networks inspired by collective behaviors of insect societies: an overview. *Swarm Intelligence, Natural Computing Series*, pages 101-160 (2008).
- [26] Fedrizzi, A., Ursin, R., Herbst, T., Nespoli, M., Prevedel, R., Scheidl, T., Tiefenbacher, F., Jennewein, T. and Zeilinger, A. High-fidelity transmission of entanglement over a high-loss free-space channel, *Nature Physics*, 5(6):389-392 (2009).
- [27] Franceschetti, M. and Meester, R. *Random Networks for Communication*, 212 pages, ISBN-10: 0521854423, ISBN-13: 978-0521854429, Cambridge University Press (2008).
- [28] Gisin, N. and Thew, R. Quantum Communication. *Nature Photon.* 1, 165-171 (2007).
- [29] Goebel, A. M., Wagenknecht, G., Zhang, Q., Chen, Y., Chen, K., Schmiedmayer, J. and Pan, J. W. Multistage Entanglement Swapping. *Phys. Rev. Lett.* 101, 080403 (2008).

- [30] Gulde, S. et al. Implementation of the Deutsch-Jozsa algorithm on an ion-trap quantum computer. *Nature* 421, 48-50 (2003).
- [31] Gyongyosi, L. and Imre, S. A Survey on Quantum Computing Technology, *Computer Science Review*, Elsevier, DOI: 10.1016/j.cosrev.2018.11.002, ISSN: 1574-0137 (2018).
- [32] Gyongyosi, L. and Imre, S. Adaptive Routing for Quantum Memory Failures in the Quantum Internet, *Quantum Information Processing*, Springer Nature, DOI: 10.1007/s11128-018-2153-x (2018).
- [33] Gyongyosi, L. and Imre, S. Decentralized Base-Graph Routing for the Quantum Internet, *Phys. Rev. A*, American Physical Society, DOI: 10.1103/PhysRevA.98.022310 (2018).
- [34] Gyongyosi, L. and Imre, S. Dynamic topology resilience for quantum networks, *Proc. SPIE 10547*, Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication XI, 105470Z; doi: 10.1117/12.2288707 (2018).
- [35] Gyongyosi, L. and Imre, S. Entanglement Availability Differentiation Service for the Quantum Internet, *Sci. Rep.*, Nature, DOI:10.1038/s41598-018-28801-3 (2018).
- [36] Gyongyosi, L. and Imre, S. Entanglement-Gradient Routing for Quantum Networks, *Sci. Rep.*, Nature, DOI:10.1038/s41598-017-14394-w (2017).
- [37] Gyongyosi, L. and Imre, S. Multilayer Optimization for the Quantum Internet, *Sci. Rep.*, DOI:10.1038/s41598-018-30957-x, Nature (2018).
- [38] Gyongyosi, L. and Imre, S. Topology Adaption for the Quantum Internet, *Quantum Information Processing*, Springer Nature, DOI: 10.1007/s11128-018-2064-x (2018).
- [39] Gyongyosi, L., Imre, S. and Nguyen, H. V. A Survey on Quantum Channel Capacities, *IEEE Communications Surveys and Tutorials* **99**, 1, doi: 10.1109/COMST.2017.2786748 (2018).
- [40] Harrow, A. W. and Montanaro, A. Quantum Computational Supremacy, *Nature*, vol 549, pages 203-209 (2017).
- [41] Hayashi, M. Prior entanglement between senders enables perfect quantum network coding with modification, *Physical Review A*, Vol.76, 040301(R) (2007).
- [42] Hayashi, M., Iwama, K., Nishimura, H., Raymond, R. and Yamashita, S. Quantum network coding, *Lecture Notes in Computer Science* (STACS 2007 SE52 vol. 4393) ed Thomas, W. and Weil, P. (Berlin Heidelberg: Springer) (2007).
- [43] Hensen, B. et al., Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres, *Nature* 526 (2015).
- [44] Higgins, B. L., Berry, D. W., Bartlett, S. D., Wiseman, H. M. and Pryde, G. J. Entanglement-free Heisenberg-limited phase estimation. *Nature* 450, 393-396 (2007).
- [45] Hucul, D. et al., Modular entanglement of atomic qubits using photons and phonons, *Nature Physics* 11(1) (2015).

- [46] Humphreys, P. et al., Deterministic delivery of remote entanglement on a quantum network, *Nature* 558 (2018).
- [47] IBM. *A new way of thinking: The IBM quantum experience*. URL: <http://www.research.ibm.com/quantum>. (2017).
- [48] Imre, S. and Balazs, F. *Quantum Computing and Communications – An Engineering Approach*, John Wiley and Sons Ltd, ISBN 0-470-86902-X (2005).
- [49] Imre, S. and Gyongyosi, L. *Advanced Quantum Communications – An Engineering Approach*. 488 pages, ISBN-10: 1118002369, ISBN-13: 978-11180023, Wiley-IEEE Press (New Jersey, USA) (2013).
- [50] Jiang, L., Taylor, J. M., Nemoto, K., Munro, W. J., Van Meter, R. and Lukin, M. D. Quantum repeater with encoding. *Phys. Rev. A*, 79:032325 (2009).
- [51] Jie, Y. and Kamal, A. E. Multi-Objective Multicast Routing Optimization in Cognitive Radio Networks, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference* (IEEE WCNC) (2014).
- [52] Jozsa, R. Fidelity for Mixed Quantum States, *J. Mod. Optics* 41, pp. 2315-2323 (1995).
- [53] Kak, A. Small-World Peer-to-Peer Networks and Their Security Issues, *Lecture Notes on Computer and Network Security*, Purdue University (2016).
- [54] Kay, A. Resources for Entanglement Distribution via the Transmission of Separable States, arXiv:1204.0366v4, *Phys. Rev. Lett.* 109, 080503 (2012).
- [55] Kimble, H. J. The quantum Internet. *Nature*, 453:1023-1030 (2008).
- [56] Kleinberg, J. The Small-World Phenomenon: An Algorithmic Perspective, *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on Theory of Computing* (STOC'00) (2000).
- [57] Kobayashi, H., Le Gall, F., Nishimura, H. and Rotteler, M. General scheme for perfect quantum network coding with free classical communication, *Lecture Notes in Computer Science* (Automata, Languages and Programming SE-52 vol. 5555), Springer) pp 622-633 (2009).
- [58] Kobayashi, H., Le Gall, F., Nishimura, H. and Rotteler, M. Perfect quantum network communication protocol based on classical network coding, *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Information Theory* (ISIT) pp 2686-90. (2010).
- [59] Kok, P., Munro, W. J., Nemoto, K., Ralph, T. C., Dowling, J. P. and Milburn, G. J. Linear optical quantum computing with photonic qubits. *Rev. Mod. Phys.* 79, 135-174 (2007).
- [60] Krisnanda, T., Zuppardo, M., Paternostro, M. and Paterek, T. Revealing non-classicality of unmeasured objects, *Phys. Rev. Lett.*, 119, 120402 (2017).
- [61] Lang, M. D. and Caves, C. M. Quantum Discord and the Geometry of Bell-Diagonal States, *Phys. Rev. Lett.* 105, 150501 (2010).

- [62] Laurenza, R. and Pirandola, S. General bounds for sender-receiver capacities in multipoint quantum communications, *Phys. Rev. A* 96, 032318 (2017).
- [63] Leepila, R., Oki, E. and Kishi, N. Scheme to Find k Disjoint Paths in Multi-Cost Networks, *IEEE International Conference on Communications (ICC) 2011*, Kyoto, Japan, DOI: 10.1109/icc.2011.5962477 (2011).
- [64] Leepila, R. *Routing Schemes for Survivable and Energy-Efficient Networks*, PhD Thesis, Department of Information and Communication Engineering, The University of Electro-Communications (2014).
- [65] Leung, D., Oppenheim, J. and Winter, A. Quantum network communication; the butterfly and beyond, *IEEE Trans. Inf. Theory* 56, 3478-90. (2010).
- [66] Li, M. S., Ji, T. Y., Tang, W. J., Wu, Q. H. and Saunders, J. R. Bacterial foraging algorithm with varying population, *Biosystems* 100(3), 185-197 (2010).
- [67] Liao, S.-K. et al. Satellite-to-ground quantum key distribution, *Nature* 549, pages 43–47 (2017).
- [68] Liu, Y., Passino, K. M. Biomimicry of Social Foraging Bacteria for Distributed Optimization: Models, Principles, and Emergent Behaviors, *Journal of Optimization Theory and Applications* Vol. 115, No. 3, pp. 603–628 (2002).
- [69] Lloyd, S. and Weedbrook, C. Quantum generative adversarial learning. *Phys. Rev. Lett.*, 121, arXiv:1804.09139 (2018).
- [70] Lloyd, S. Capacity of the noisy quantum channel. *Physical Rev. A*, 55:1613–1622 (1997).
- [71] Lloyd, S. The Universe as Quantum Computer, *A Computable Universe: Understanding and exploring Nature as computation*, H. Zenil ed., World Scientific, Singapore, arXiv:1312.4455v1 (2013).
- [72] Lloyd, S., Mohseni, M. and Rebentrost, P. Quantum algorithms for supervised and unsupervised machine learning. *arXiv:1307.0411* (2013).
- [73] Lloyd, S., Mohseni, M. and Rebentrost, P. Quantum principal component analysis. *Nature Physics*, 10, 631 (2014).
- [74] Lloyd, S., Shapiro, J. H., Wong, F. N. C., Kumar, P., Shahriar, S. M. and Yuen, H. P. Infrastructure for the quantum Internet, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 34(5):9–20 (2004).
- [75] Matsuo, T., Satoh, T., Nagayama, S. and Van Meter, R. Analysis of Measurement-based Quantum Network Coding over Repeater Networks under Noisy Conditions, *Phys. Rev. A* 97, 062328 (2018).
- [76] Monz, T. et al. Realization of a scalable Shor algorithm. *Science* 351, 1068-1070 (2016).
- [77] Moore, G. E. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, vol. 38, 8, pp.114 (1965).

- [78] Motevasel, M., Bazyari, S. Probabilistic Energy Management of micro-grids with respect to Economic and Environmental Criteria, *Science Journal (CSJ)*, Vol. 36, No: 3 Special Issue, ISSN: 1300-1949 (2015).
- [79] Munro, W. J., Stephens, A. M., Devitt, S. J., Harrison, K. A. and Nemoto, K. Quantum communication without the necessity of quantum memories, *Nature Photonics* 6, 777- 781 (2012).
- [80] Muralidharan, S., Kim, J., Lutkenhaus, N., Lukin, M. D. and Jiang, L. Ultrafast and Fault-Tolerant Quantum Communication across Long Distances, *Phys. Rev. Lett.* 112, 250501 (2014).
- [81] Neumann, F. and Witt, C. Bioinspired computation in combinatorial optimization algorithms and their computational complexity. *Natural Computing Series* (2010).
- [82] Newman, M., Watts, D. and Barabasi, A. L. *The Structure and Dynamics of Networks*, Princeton University Press (2006).
- [83] Nielsen, M. A. The entanglement fidelity and quantum error correction, *arXiv:quant-ph/9606012* (1996).
- [84] Niu, B., Fan, Y., Xiao, H. and Bing, X. Bacterial foraging based approaches to portfolio optimization with liquidity risk, *Neurocomputing* 98, 90-100 (2012).
- [85] Noelleke, C. et al, Efficient Teleportation Between Remote Single-Atom Quantum Memories, *Physical Review Letters* 110, 140403 (2013).
- [86] Ofek, N. et al. Extending the lifetime of a quantum bit with error correction in superconducting circuits. *Nature* 536, 441-445 (2016).
- [87] Pant, M., Krovi, H., Towsley, D., Tassiulas, L., Jiang, L., Basu, P., Englund, D. and Guha, S. Routing entanglement in the quantum internet, *arXiv:1708.07142* (2017).
- [88] Park, J., Lee, S. Separable states to distribute entanglement, *arXiv:1012.5162v2*, *Int. J. Theor. Phys.* 51 (2012) 1100-1110 (2010).
- [89] Petz, D. *Quantum Information Theory and Quantum Statistics*, Springer-Verlag, Heidelberg, Hiv: 6. (2008).
- [90] Pinto, D., Baran, B. Solving multiobjective multicast routing problem with a new ant colony optimization approach. *Proceedings of ACM, International IFIP/ACM Latin American Conference on Networking* (2005).
- [91] Pirandola, S. Capacities of repeater-assisted quantum communications, *arXiv:1601.00966* (2016).
- [92] Pirandola, S., Braunstein, S. L., Laurenza, R., Ottaviani, C., Cope, T. P. W., Spedalieri, G. and Banchi, L. Theory of channel simulation and bounds for private communication, *Quantum Sci. Technol.* 3, 035009 (2018).

- [93] Pirandola, S., Laurenza, R., Ottaviani, C. and Banchi, L. Fundamental limits of repeaterless quantum communications, *Nature Communications*, 15043, doi:10.1038/ncomms15043 (2017).
- [94] Preskill, J. Quantum Computing in the NISQ era and beyond, *Quantum* 2, 79 (2018).
- [95] Quantum Internet Research Group (QIRG), web: <https://datatracker.ietf.org/rg/qirg/about/> (2018).
- [96] Rak, J. *Resilient Routing in Communication Networks*, Springer (2015).
- [97] Rak, J. k-penalty: A Novel Approach to Find k-Disjoint Paths with Differentiated Path Costs, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, no. 4, pp. 354-356 (2010).
- [98] Rani, B. S., Kumar, C. A. A Comprehensive Review on Bacteria Foraging Optimization Technique, *Multi-objective Swarm Intelligence*, Theoretical Advances and Applications, Studies in Computational Intelligence, Volume 592, Springer (2015).
- [99] Ren, J.-G. et al. Ground-to-satellite quantum teleportation, *Nature* 549, pages 70–73 (2017).
- [100] Rozpedek, F., Schiet, T., Thinh, L., Elkouss, D., Doherty, A., and S. Wehner, Optimizing practical entanglement distillation, *Phys. Rev. A* 97, 062333 (2018).
- [101] Saleem, G. A. D. C. M., Farooq, M. Swarm intelligence based routing protocol for wireless sensor networks: survey and future directions. *Information Sciences*, 181(20):4597-4624 (2011).
- [102] Sandberg, O. Distributed Routing in Small-World Networks, *ALLENEX* (2006).
- [103] Sangouard, N., Dubessy, R. and Simon, C. Quantum repeaters based on single trapped ions. *Phys. Rev. A*, 79, 042340 (2009).
- [104] Sangouard, N. et al., Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics, *Reviews of Modern Physics* 83, 33 (2011).
- [105] Schoute, E., Mancinska, L., Islam, T., Kerenidis, I. and Wehner, S. Shortcuts to quantum network routing, *arXiv:1610.05238* (2016).
- [106] Schumacher, B. Sending quantum entanglement through noisy channels, *Phys Rev A*. 54(4), 2614-2628 (1996).
- [107] Sheng, Y. B., Zhou, L. Distributed secure quantum machine learning. *Science Bulletin*, 62, 1025-2019 (2017).
- [108] Shor, P. W. Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring. In *Proc. 35th Symposium on Foundations of Computer Science*, 124–134, Los Alamitos, CA, IEEE Computer Society Press (1994).
- [109] Shor, P. W. Fault-tolerant quantum computation, *37th Symposium on Foundations of Computing*, IEEE Computer Society Press, pp. 56-65 (1996).

- [110] Shor, P. W. Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory. *Phys. Rev. A*, 52, R2493-R2496 (1995).
- [111] Simon, C., de Riedmatten, H., Afzelius, M., Sangouard, N., Zbinden, H. and Gisin N. Quantum Repeaters with Photon Pair Sources and Multimode Memories. *Phys. Rev. Lett.* 98, 190503 (2007).
- [112] Streltsov, A., Kampermann, H. and Bruss, D. Quantum cost for sending entanglement, *Phys. Rev. Lett.* 108, 250501 (2012).
- [113] Taherkhani, M. A., Navi, K. and Van Meter, R. Resource-aware System Architecture Model for Implementation of Quantum aided Byzantine Agreement on Quantum Repeater Networks, *arXiv:1701.04588* (2017).
- [114] Tittel, W., Afzelius, M., Chaneliere, T., Cone, R. L., Kroll, S., Moiseev, S. A. and Sellars, M. Photon-echo quantum memory in solid state systems. *Laser Photon. Rev.* 4, 244-267 (2009).
- [115] Vandersypen, L. M. K. et al. Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance. *Nature* 414, 883-887 (2001).
- [116] Van Loock, P., Ladd, T. D., Sanaka, K., Yamaguchi, F., Nemoto, K., Munro, W. J. and Yamamoto, Y. Hybrid quantum repeater using bright coherent light. *Phys. Rev. Lett.* 96, 240501 (2006).
- [117] Van Meter, R. *Architecture of a Quantum Multicomputer Optimized for Shor's Factoring Algorithm*, PhD Dissertation, Keio University, *arXiv:quant-ph/0607065v1* (2006).
- [118] Van Meter, R. *Quantum Networking*, John Wiley and Sons Ltd, ISBN 1118648927, 9781118648926 (2014).
- [119] Van Meter, R. and Devitt, S. J. Local and Distributed Quantum Computation, *IEEE Computer* 49(9), 31-42 (2016).
- [120] Van Meter, R., Ladd, T. D., Munro, W. J. and Nemoto, K. System Design for a Long-Line Quantum Repeater, *IEEE/ACM Transactions on Networking* 17(3), 1002-1013 (2009).
- [121] Van Meter, R., Satoh, T., Ladd, T. D., Munro, W. J. and Nemoto, K. Path Selection for Quantum Repeater Networks, *Networking Science*, Vol. 3, Issue 1-4, pp 82-95 (2013).
- [122] Van Meter, R., Satoh, T., Nagayama, S., Matsuo, T. and Suzuki, S. Optimizing Timing of High-Success-Probability Quantum Repeaters, *arXiv:1701.04586* (2017).
- [123] Vedral, V. and Plenio, M. B. Entanglement measures and purification procedures, *Phys. Rev. A* 57, 1619-1633 (1998).
- [124] Vedral, V. The role of relative entropy in quantum information theory, *Rev. Mod. Phys.* 74, 197-234 (2002).
- [125] Vedral, V., Plenio, M. B., Rippin, M. A. and Knight, P. L. Quantifying Entanglement, *Phys. Rev. Lett.* 78, 2275-2279 (1997).

- [126] Wang, W. et al. Efficient interference-aware TDMA link scheduling for static wireless networks. *Proceedings of ACM, International Conference on Mobile Computing and Networking* (2006).
- [127] Wehner, S., Elkouss, D., and R. Hanson. Quantum internet: A vision for the road ahead, *Science* 362, 6412 (2018).
- [128] Wootters, W. and Zurek, W. H. A single quantum cannot be cloned. *Nature*, 299:802–803, doi:10.1038/299802a0. (1982).
- [129] Xiao, Y. F., Gong, Q. Optical microcavity: from fundamental physics to functional photonics devices. *Science Bulletin*, 61, 185-186 (2016).
- [130] Yuan, Z., Chen, Y., Zhao, B., Chen, S., Schmiedmayer, J. and Pan, J. W. *Nature* 454, 1098-1101 (2008).
- [131] Zhang, W. et al. Quantum Secure Direct Communication with Quantum Memory. *Phys. Rev. Lett.* 118, 220501 (2017).
- [132] Zhang, Y., Zhou, W. and Yi, J. A Novel Adaptive Chaotic Bacterial Foraging Optimization Algorithm, *2016 International Conference on Computational Modeling, Simulation and Applied Mathematics* (2016).
- [133] Zhao, B., Chen, Z. B., Chen, Y. A., Schmiedmayer, J. and Pan, J. W. Robust creation of entanglement between remote memory qubits. *Phys. Rev. Lett.* 98, 240502 (2007).